



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

“METODOLOGIA DE OBTENÇÃO DE CURVAS DE COLINA USANDO  
REDES NEURAS PARA GERAÇÃO HIDROELÉTRICA”

ISMAEL OLIVEIRA PASSOS

DM-22/2011

UFPA/ITEC/PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ISMAEL OLIVEIRA PASSOS

“METODOLOGIA DE OBTENÇÃO DE CURVAS DE COLINA USANDO REDES  
NEURAIS PARA GERAÇÃO HIDROELÉTRICA”

Dissertação submetida à Banca  
Examinadora do Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Elétrica da  
UFPA para a obtenção do Grau de  
Mestre em Engenharia Elétrica

DM-22/2011

UFPA / ITEC/ PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2011

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**“METODOLOGIA DE OBTENÇÃO DE CURVAS DE COLINA USANDO REDES  
NEURAIS PARA GERAÇÃO HIDROELÉTRICA”**

**AUTOR: ISMAEL OLIVEIRA PASSOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA.

APROVADA EM: / / 2011

BANCA EXAMINADORA:

---

**Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes (UFPA)  
ORIENTADOR**

---

**Dr. João Paulo Abreu Vieira (UFPA)  
CO-ORIENTADOR**

---

**Dr. Walter Barra Junior (UFPA)  
MEMBRO DA BANCA EXAMINADORA**

---

**Dr. André Cavalcante Nascimento (UFPA)  
MEMBRO DA BANCA EXAMINADORA**

VISTO:

---

**Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes (UFPA)  
COORDENADOR DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

*“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim.”*

*Chico Xavier*

## DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação aos meus pais pela educação valorosa, incentivo, apoio, lições dadas e persistência para eu seguir o caminho do bem e alcançar os objetivos pelo merecimento próprio.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela saúde e boas inspirações recebidas ao longo desta trajetória.

Aos meus pais pela valorosa educação, pelos ensinamentos para eu me tornar uma pessoa de bem, ética e de caráter. Por incentivar sempre meus estudos para crescimento profissional, pessoal e espiritual.

À minha amada esposa Juliana pelo grande incentivo, carinho, amor e paciência em todos os momentos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes pelas orientações e apoio.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. João Paulo Abreu Vieira pelos incentivos, ensinamentos e grande apoio no desenvolvimento desta dissertação.

Aos professores, amigos, colegas e funcionários do curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pelo excelente convívio e pela colaboração neste trabalho.

A Universidade Federal do Pará que me proporcionou a oportunidade de conquistar mais esta vitória.

## RESUMO

Os avanços tecnológicos contínuos ocorridos no setor elétrico apontam para novas metodologias que visam solucionar problemas existentes na operação dos sistemas de potência para resultar no aumento de seus índices de confiabilidade e eficiência. Esta dissertação apresenta uma metodologia para aperfeiçoar a obtenção das curvas (ou diagramas) de colina que são fundamentais na modelagem das turbinas hidráulicas. A modelagem das turbinas que utilizam recursos computacionais é mais precisa, além de ter uma construção facilitada, em detrimento da modelagem tradicional de forma manual que é de certa forma intuitiva, imprecisa e trabalhosa. O modelo físico das turbinas hídras do presente trabalho foi implementado através de uma ferramenta de simulação, desenvolvida no ambiente computacional MATLAB®, baseado em redes neurais artificiais, sendo utilizada a arquitetura MLP e o algoritmo back-propagation, culminando no programa para determinação das curvas de colina chamado de *curvas\_colina\_rna*. A escolha da técnica das RNAs, tipo de arquitetura da rede e algoritmo de aprendizado tiveram propósito de facilitar a aquisição das curvas de colina e melhor validar a proposta do trabalho. Para realizar as escolhas mencionadas, será anteriormente apresentada uma contextualização do problema, os componentes foco dos estudos envolvidos no processo de geração de energia hidrelétrica, como as turbinas hídras e tipos de reservatórios. Os resultados apresentados na execução do programa confirmam uma consistência da modelagem proposta para a obtenção das curvas de colina, sendo que os ganhos de rendimentos foram observados à medida que a altura de queda, a vazão d'água e a rotação da turbina se aproximaram das especificadas no projeto, e ainda maior quando comparado a sistemas de rotação fixa tradicional, o que representa uma otimização da operação da turbina.

## ABSTRACT

Technological advances continue to occur in the electricity sector point to new approaches aimed at solving existing problems in the operation of power systems to result in increasing their levels of reliability and efficiency. This dissertation presents a methodology for improving the curves (or diagrams) that are central hill in the modeling of hydraulic turbines. The modeling of turbines that use computer resources are more accurate, and has facilitated a building at the expense of traditional modeling by hand in a way that is intuitive, imprecise and laborious. The physical model of the hydro turbine was implemented through a simulation tool developed in MATLAB® computing environment based on artificial neural networks, using the MLP architecture and back-propagation algorithm, culminating in the program to determine the curves of the hill called `curvas_colina_rna`. The choice of technique of RNAs, type of network architecture and learning algorithm were intended to facilitate the acquisition of the best hill curves to validate the proposed work. To make the choices mentioned above will be presented with a contextualization of the problem, the components involved in hydroelectric power generation such as wind turbines and types of water reservoirs. After simulations, the results presented in the program confirm the consistency of proposed model for the hill curves is that income gains were seen as the height of fall, the water flow and rotation of the turbine approached specified in the project, and even greater when compared to traditional fixed rotation systems, which represents an optimization of the operation of the turbine.



## SUMÁRIO

Dedicatória .....	v
Agradecimentos .....	vi
Resumo .....	vii
Abstract .....	viii
Lista de figuras .....	xi
Lista de siglas e abreviações.....	xiii
<b>1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1 - Contextualização do problema .....	14
1.2 - Geração Hidráulica de Energia Elétrica com velocidade fixa e ajustável .....	17
1.3 - Estado da arte .....	22
1.4 - Objetivos da dissertação .....	25
1.5 - Apresentação do trabalho .....	26
<b>2 - GERAÇÃO HIDROELÉTRICA DE ENERGIA.....</b>	<b>27</b>
2.1 - Introdução.....	27
2.2 - Componentes básicos de uma usina hidrelétrica.....	27
2.3 - Classificações das centrais hidroelétricas.....	29
2.4 - Recapitação e modernização.....	41
2.5 - Conclusão.....	42
<b>3- MODELAGEM DE TURBINAS HÍDRICAS E DIAGRAMAS DE COLINA.....</b>	<b>43</b>
3.1 - Introdução.....	43
3.2 - Tipos de Turbinas.....	43
3.3 - Modelagem das turbinas hídricas.....	49
3.4 - Velocidade ajustável aplicada aos diferentes tipos de turbinas .....	55
3.5 - Conclusões.....	56
<b>4 - REDES NEURAS ARTIFICIAIS.....</b>	<b>57</b>
4.1 - Introdução .....	57
4.2 - Rede Neural Artificial genérica.....	58
4.3 - A Representação de Conhecimentos .....	60
4.3.1 – Funções de Ativação.....	61
4.3.2 – Aprendizado.....	62
4.4 – Arquiteturas mais usuais de RNAs.....	67
4.5 - Conclusão.....	73
<b>5 - METODOLOGIA PROPOSTA PARA OBTENÇÃO DAS CURVAS DE COLINA USANDO REDES NEURAS ARTIFICIAIS.....</b>	<b>74</b>
5.1 - Introdução.....	74
5.2 - O modelo da RNA para a determinação das curvas de colina: A rede “Back-Propagation” utilizada no programa .....	74
5.3 - Turbinas hidráulicas com melhor aplicação da técnica de modelagem para sistemas em velocidade variável.....	77
5.4 - A Aplicação teórica das Redes Neurais na determinação do Diagrama de Colinas de turbinas hidráulicas: o programa <i>curvas_colina_rna</i> proposto.....	80
5.5 - Resultados obtidos a partir da simulação do programa <i>curvas_colina_rna</i> .....	86

5.6 - Conclusões.....	92
<b>6 - CONCLUSÕES .....</b>	<b>94</b>
6.1 - Conclusões gerais .....	94
6.2 - Sugestões para Futuros Trabalhos.....	95
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>96</b>

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 – Central hidroelétrica com reservatório de captação: Luiz Carlos Barreto Carvalho (antiga central de Estreito), próximo de Franca, SP.
- Figura 2.2 – Esquema de uma central hidroelétrica de acumulação por bombeamento.
- Figura 2.3 – Usina reversível de Yanbaru, Japão
- Figura 2.4 – Central hidroelétrica de Porto Colômbia (esq.) e Central de Henry Borden (dir.), Cubatão, SP.
- Figura 2.5 – Microcentral hidrelétrica Boa Esperança em MG.
- Figura 3.1 – Tipos de turbinas.
- Figura 3.2 - Seção de um aproveitamento que opera com turbinas bulbo.
- Figura 3.3 – Modelo da turbina bulbo da usina de Tadami, Japão.
- Figura 3.4 - Diagrama de Colina de ensaio em modelo reduzido da turbina Francis da Itaipu binacional
- Figura 3.5 - Diagramas colinas; a)  $H \times P$ , para rotação constante, igual a 300 rpm; b)  $H \times Q$ , para rotação constante, igual a 300 rpm.
- Figura 3.6 – Curvas de colina através do método tradicional em papel milimetrado.
- Figura 3.7 - Curva-Colina de Uma Unidade Hidrelétrica.
- Figura 3.8 - Comparação entre as curvas de colina das turbinas bulbo, propeller, Kaplan, Francis, e de impulso.
- Figura 4.1 – Modelo e função matemática de um neurônio.
- Figura 4.2 – Modelo de neurônio artificial.
- Figura 4.1 - Algumas funções de ativação; (a) linear; (b) rampa; (c) *step* (d) sigmoidal.
- Figura 2.4 - Aprendizado Supervisionado
- Figura 4.3 - Aprendizado Não Supervisionado
- Figura 4.4 - Aprendizado por Reforço.
- Figura 4.5 - Topologia de um perceptron simples com uma única saída
- Figura 4.8 -Topologia genérica do perceptron multi-camadas.
- Figura 4.9 - Fluxo de Processamento do algoritmo back-propagation.
- Figura 5.1 – Exemplos mais comuns de funções de transferências utilizadas em sistemas computacionais de redes neurais.
- Figura 5.2 – Exemplo comum de rede de duas camadas de neurônios apresentando duas entradas e uma saída.
- Figura 5.3 – Princípio conceitual da operação em rotação ajustável

Figura 5.4 – Aumento do rendimento pela variação da rotação

Figura 5.5 – Curvas de Colina

Figura 5.6 – Exemplo da rede do programa apresentando duas entradas (x e y) e uma saída (z).

Figura 5.7 - Laboratório Hidromecânico para Pequenas Centrais Hidrelétricas – LHPCH.

Figura 5.8 – Curvas de colina para altura de 8 m.

Figura 5.9 – Curvas de colina traçado de forma tradicional manualmente para  $h = 8$  m

Figura 5.10 – Curvas de colina para altura de 10 m.

Figura 5.11 – Curvas de colina traçado de forma tradicional manualmente para  $h = 10$  m.

Figura 5.12 – curvas de colina para altura igual a 12 m.

Figura 5.13 – Curvas de colina traçado de forma tradicional manualmente para  $h=12$  m.

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica.

CA – Corrente alternada.

CC – corrente contínua.

CCAT / HVDC - corrente contínua em alta tensão (em inglês *HVDC – High Voltage direct current*).

DNAEE - Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica.

EFEI - Escola Federal de Engenharia de Itajubá.

ELETROBRÁS- Centrais Elétricas Brasileiras S.A.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética.

GTO - tiristor *Gate Turn Off* (desligamento pelo gate).

IEA - International Energy Agency.

LHPCH - Laboratório Hidromecânico para Pequenas Centrais Hidrelétricas.

MLP – Perceptron Multicamadas (em inglês *MultiLayer Perceptrons*).

MME - Ministério de Minas e Energia.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico.

PCH - Pequenas Centrais Hidrelétricas.

PNE - Plano Nacional de Energia.

PNPCH - Programa Nacional de Pequenas Centrais Hidrelétricas.

RNA – Redes neurais artificiais.

SIN - Sistema Interligado Nacional.

USP - Universidade de São Paulo.

# 1 – INTRODUÇÃO.

## 1.1 - Contextualização do problema.

A incapacidade de investimentos do Governo levou o Setor Elétrico Brasileiro a enfrentar, nos últimos anos, elevados riscos de déficit de energia e de capacidade de geração, bem como crescentes restrições na transmissão. Este processo deu início em 1995 à abertura do setor de energia elétrica, ou em outras palavras, à desregulamentação do mercado de energia, através da promulgação da lei 8987 de 13/02/95, na qual as concessões e permissões de serviços públicos passaram a ser outorgadas através de licitação pública.

A abertura de mercado, citada no parágrafo anterior, juntamente com a elevada taxa de crescimento no consumo de energia elétrica no Brasil, verificada nos últimos anos, e o problema dos custos envolvidos com a construção ou aumento na capacidade das linhas de transmissão, têm resultado no surgimento de um considerável número de pequenas unidades geradoras conectadas à rede local, seja ela de distribuição, subtransmissão ou mesmo transmissão em EAT. Este desenvolvimento aproxima a carga dos sistemas produtores de energia elétrica, reduzindo os efeitos negativos na dependência da geração centralizada e os custos e perdas elétricas na transmissão, além dos problemas sociais e ambientais ligados à construção de grandes centrais. Esta nova abordagem que contempla o uso de geradores menores, próximos aos centros de carga, assim como, dispositivos de armazenamento de energia, representa um novo conceito de operação que tem sido denominada geração distribuída, conforme Gomes *et al.* (1999a). Outras estratégias, como o gerenciamento da demanda, como mencionado por Uturbey & Simões Costa (2002), são também adotadas dentro desta nova configuração de desregulamentação do mercado de energia elétrica.

A geração distribuída (ou dispersa) contribui para o reforço e redução das perdas em redes longas e fracas, que não são servidas por grandes linhas de transmissão ou subestações. O comportamento dos geradores integrados a estes alimentadores longos é similar ao dos sistemas de geração isolada em redes fracas, e estão sujeitos aos mesmos fenômenos de limitação na capacidade da potência a ser transmitida e variação de tensão e frequência, diante das alterações nas condições da geração e da carga a ser atendida, segundo Barker & De Mello (2000).

Silveira *et al.* (1999) mostra que esta nova configuração do sistema elétrico criou a figura de outros agentes como os co-geradores, produtores independentes de energia e os

operadores independentes, e propiciou a possibilidade do aproveitamento de fontes primárias renováveis, para fins de geração de energia integrada à rede, favorecendo o uso de novas tecnologias, como os geradores assíncronos, como proposto por Souza *et al.* (2001) e os conversores estáticos no suprimento da potência ativa ao sistema elétrico, conforme Nunes, *et al.* (2003).

No caso específico do Brasil, os aproveitamentos das pequenas centrais hidrelétricas, gás natural e da energia hidráulica, como elucidado por Gomes *et al.* (1999b), vêm mostrando boa viabilidade técnica e econômica, para fins de geração integrada à rede elétrica em sistemas de geração distribuída, ou independentes da rede em sistemas isolados, segundo Nunes & Bezerra (1999). A possibilidade de utilização dos sistemas hidráulicos em nível mundial mostrou um crescimento na capacidade instalada para produção de energia em grandes centrais e em PCHs (pequenas centrais hidroelétricas). Além disso, o aspecto ambiental corresponde a um fator importante que norteia atualmente a integração das fontes alternativas à rede elétrica. A UNIDO (2004) considera que o desenvolvimento das facilidades hidrelétricas oferece vantagens relevantes na questão de emissões atmosféricas.

Levando em conta a crise ocorrida no suprimento de energia elétrica e as projeções da nova orientação política sobre o modelo do setor elétrico, o PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica) que estabeleceu a instalação de 1.1 GW de PCHs para fins de geração integrada à rede elétrica é um forte aliado para ajudar a solucionar algumas dessas questões, incentivando a geração de energia através das fontes alternativas. (Souza, 2005).

O potencial hidráulico e seu desenvolvimento, é ressaltado por Tolmasquim (2005), pois o desenvolvimento do potencial hidráulico de um país está relacionado com seu desenvolvimento econômico. De uma forma geral, países economicamente desenvolvidos apresentam uma taxa de aproveitamento de seu potencial hidráulico bastante superior à dos países em desenvolvimento.

Conforme Boyle (1996), a energia potencial hidráulica mundial é da ordem de 200 mil TWh por ano, e cerca de 65% desse recurso, estão concentrados em apenas 10 países, todos com potencial igual ou superior a 1.000 TWh/ano, em que, o Brasil, ocupa o terceiro posto, superado apenas por China e pelos Estados Unidos. Tomados em conjunto, esses três países detêm mais de  $\frac{1}{3}$  do potencial tecnicamente aproveitável do mundo.

É evidente a grande importância da matriz hidroelétrica, especialmente no Brasil que tem como base a hidroenergia, em que a oferta interna de energia hidráulica no país atingiu, em 2005, 377 TWh, sendo 340,5 TWh correspondentes à produção de usinas nacionais e o

restante à importação (basicamente a metade paraguaia de Itaipu), como aponta o Balanço Energético Nacional (EPE, 2006b) e geraram, em 2005, 93% da energia elétrica requerida no Sistema Interligado Nacional – SIN (ONS, 2006), porém, apenas cerca de 30% do potencial hidrelétrico nacional já foi explorado, proporção bem menor do que a observada nos países industrializados. Nesse contexto, muitos defendem que a base da expansão da oferta de energia elétrica no Brasil seja, mesmo em uma perspectiva de longo prazo, a hidroenergia (TOLMASQUIM, 2005; ANEEL, 2006).

Os sistemas de geração hidroelétrica no Brasil seguem a solução clássica do uso do conjunto turbina-gerador operando à rotação fixa. A velocidade do rotor do gerador permanece fixa para mantê-la sincronizada com a frequência da rede elétrica. Já os hidrogeradores em esquemas de velocidade ajustável desacoplam, por meio de conversores estáticos, a frequência do rotor da frequência da rede, em função das condições operativas reais, melhorando o aproveitamento energético de forma significativa (Fraile-Ardanuy, et al., 2006).

Dentre as tecnologias empregadas na geração de energia em esquemas de velocidade ajustável, tende-se, mundialmente, a um crescimento da utilização de geradores de indução duplamente excitados (DFIG) controlados por conversores estáticos, com larga aplicação desta tecnologia em sistemas hidráulicos integrados em redes elétricas, conforme proposto por Nunes et al. (2004), possibilitando-se assim também uma tendência generalizada pela adoção desta mesma tecnologia em sistemas de geração hidroelétrica.

A operação do gerador hídrico DFIG em velocidade ajustável resulta no aumento da eficiência energética. No entanto, esta não é a única vantagem desta tecnologia, pois a mesma apresenta ainda uma flexibilidade do controle oferecido pelos conversores estáticos, que possibilitam manter a tensão terminal constante, mesmo quando a máquina opera em velocidade ajustável, permitindo o controle independente de potência ativa e reativa que a máquina troca com a rede elétrica. Além disso, estes conversores estáticos processam somente 25% a 30% da potência nominal da máquina, e também usam uma alta frequência de chaveamento, garantindo um alto desempenho, tais como uma rápida resposta dinâmica com baixa distorção harmônica conforme Nunes (2003) e Almeida, et al. (2006).



## 1.2 - Geração Hidráulica de Energia Elétrica com velocidade fixa e ajustável.

Para interligar as usinas elétricas ao sistema elétrico de potência é necessário que sejam observados os parâmetros de tensão e frequência deste sistema. Esta última exigência, desconsiderando-se pequenas oscilações, somada à utilização clássica de geradores síncronos com acoplamento direto com o eixo da turbina, impõe a operação da turbina hidráulica em velocidade de rotação mecânica constante, sendo a mesma continuamente controlada através de sistemas reguladores de velocidade.

Nesta operação clássica, a turbina hidráulica é projetada para operar sob certa altura de queda e vazão de águas mais frequentemente esperadas, produzindo sob esta condição a máxima potência mecânica possível. Considerando-se que esta é a condição de maior rendimento da turbina, a operação da usina hidrelétrica terá um rendimento menor que o nominal sempre que as condições hidráulicas não forem as especificadas no projeto. Além das influências hidráulicas, as alterações de carga e contingências no sistema de transmissão ou na própria planta geradora que resultem na variação da potência entregue pela usina, levam também a uma condição de operação com menor rendimento.

Devido a uma maior preocupação com o meio ambiente, bem como as restrições impostas por políticas recessivas, o crescimento da capacidade de geração e transmissão dos sistemas de energia elétrica tem sido reduzido. Isso tem levado a um congestionamento das vias de transmissão, a subutilização e a incapacidade de controle do sistema como um todo, principalmente no que diz respeito à potência reativa.

Atualmente, em consequência da evolução tecnológica e da redução dos custos da eletrônica de potência, é possível desacoplar a frequência elétrica do gerador da velocidade de rotação mecânica da turbina através da utilização de conversores estáticos em conjunto com geradores de indução duplamente alimentados.

Desta forma, é permitido ajustar a rotação da turbina em função das condições operativas, visando operá-la sempre no ponto de maior rendimento possível, tendo como condicionante a potência a ser extraída do conjunto, e com isso aperfeiçoar a operação da usina hidrelétrica. Esta forma de operação proposta é designada de rotação ajustável, como indicou o grupo de trabalho da CIGRÉ (1994) apud Saidel (1995) que substituiu a designação “*variable speed*” por “*adjustable speed*”, sendo o mais correto do ponto de vista semântico, pois a idéia desta forma de operação é de um ajuste contínuo da rotação do conjunto turbina-gerador, segundo uma função previamente definida.

Diferentemente da operação clássica, onde a turbina mecânica tem a sua vazão controlada pelo regulador de velocidade em consequência da variação da potência elétrica solicitada pelo sistema, e por esta razão pode operar em condições de perda de desempenho, a alternativa de operação com rotação ajustável, através do controle da velocidade em cerca de  $\pm 15\%$  do seu valor nominal, possibilita maximizar o rendimento do hidrogerador para um grande número de combinações de potência elétrica, vazão e altura de queda de água. [SAIDEL, 1995].

Embora a operação com velocidade ajustável resulte no aumento da eficiência com conseqüente otimização da energia gerada pela usina, este não é o único benefício obtido com a adoção desta tecnologia. A possibilidade de controle combinado, entre a velocidade de rotação mecânica e frequência de excitação do campo magnético, promove um comportamento dinâmico com a habilidade de intercâmbio de energia entre a massa girante da máquina e o sistema de transmissão de potência, e, através desta rápida injeção de potência a máquina contribui para melhorar a estabilidade dinâmica, quando comparada a uma máquina síncrona convencional.

A instalação de máquinas com estas características promove um maior amortecimento das oscilações do sistema e aumenta a estabilidade angular, elevando o limite de transmissão de potência, principalmente onde as usinas geradoras são interligadas ao sistema elétrico de potência através de longas linhas de transmissão [KELBER, 1997].

A geração de energia em velocidade ajustável e os benefícios agregados a esta tecnologia promove um novo conceito. Além de se obter benefícios ambientais com a redução da área alagada, através da operação em cotas inferiores, mantendo a mesma produção de energia de uma usina convencional, têm-se benefícios energéticos com o aumento da eficiência de todo o processo de geração de energia [SOUZA, 2005].

Por fim, podem-se obter ganhos operacionais, com o aumento da confiabilidade e da estabilidade através da eliminação de restrições operativas devidas aos “gargalos” da transmissão e esquemas de proteção de segurança, oferecendo condições de geração adicional de potência e possível adiamento ou eliminação de investimentos em novas linhas de transmissão, capacitores série, compensadores estáticos ou em outros equipamentos com o objetivo de aumento do limite de estabilidade transitória [SOUZA, 2005].

Tradicionalmente, as centrais hidrelétricas operam suas turbinas hidráulicas com rotação constante em função do número de pares de pólos e da frequência do gerador, que devem ser constantes. Esta relação de compromisso fez com equipamentos mais modernos, como os conversores estáticos, fossem desenvolvidos para possibilitar que a máquina

síncrona, a qual necessita de funcionamento em velocidade de rotação constante, pudesse funcionar como um gerador elétrico mesmo em condições adversas como é o caso em processos de aproveitamento de energia intrinsecamente sazonais como o de armazenamento de água nos reservatórios ou através da vazão natural proporcionada pelos rios.

Entre outros, merece destaque a atual engenharia de fabricação dos reguladores de velocidade e a engenharia de novos projetos de turbinas para os aproveitamentos hidráulicos. O primeiro desempenha papel fundamental na estabilidade dos sistemas de potência uma vez que mantém a velocidade angular constante, atuando diretamente sobre o fluxo da água que aciona a turbina. Essa atuação dá-se através de sistemas hidráulicos, os quais, através de um sistema de controle, regulam a posição das palhetas diretrizes presentes em volta do rotor da turbina.

Vale salientar que a turbina mecânica é uma máquina de velocidade variável, e na sua operação com velocidade fixa em condições de altura de queda hidráulica, despacho elétrico e vazão diferente dos valores nominais, sempre resultarão em uma redução da eficiência do processo de conversão de energia mecânica, conforme Souza (2005).

No decorrer dos anos a eletrônica de potência vem se aperfeiçoando, ao ponto de na atualidade oferecer alternativas que eliminam as restrições exercidas pelo sistema elétrico de potência sobre a forma de operação do sistema eletromecânico de geração hidráulica. Alternativas estas que possibilitam a conversão de energia quebrando o elo entre a velocidade de rotação mecânica da turbina e a frequência elétrica do sistema elétrico, como os cicloconvertidores, como mencionou Kitta (1991).

### **1.2.1 - Tecnologias para Geração Hidráulica em Velocidade Ajustável.**

Entre as diversas formas de produção de energia elétrica, a hidreletricidade é, de longe, e desde há muito, a que apresenta a maior eficiência no processo de conversão. As perdas estão concentradas, basicamente, nos circuitos hidráulicos e no grupo turbina-gerador, que já têm, hoje, rendimento superior a 92%.

Para Saidel (1995), quanto à geração, a morfologia da região amazônica, onde se concentra a maior do potencial hidrelétrico brasileiro a aproveitar, sugere usinas hidrelétricas de baixa queda e elevada vazão turbinada. Isso significa a aplicação de turbinas de um tipo

pouco comum no sistema brasileiro. E ainda: significa potências unitárias elevadas para esse tipo de turbina.

Além disso, ainda no campo da geração, há a questão da recapacitação e modernização de usinas existentes, idéia que ganha força na medida do avanço cronológico dos equipamentos em operação.

Da mesma forma, aspectos tecnológicos são também relevantes na questão da transmissão que permitam maximizar o volume de energia transportado para minimizar impactos sobre o meio físico.

A tecnologia de geração com velocidade ajustável apresenta uma flexibilidade que irá auxiliar na integração com os usos da água e nos casos em que for necessário o rebaixamento de nível ou a alocação de um volume de espera dos reservatórios.

O ajuste coordenado da altura de queda da turbina com a sua velocidade de rotação, não permite que ocorram as chamadas “perdas por deplecionamento” que diminuem o rendimento da turbina mecânica, visto que nos aproveitamentos de velocidade fixa com uso de máquinas síncronas, as mesmas são projetadas para operar sob certa altura de queda e vazão mais freqüentemente esperadas. É por esta razão, que sempre que se impõe uma operação hidroenergética adversa, a usina trabalha sob um rendimento inferior àquele para o qual foi projetada.

Os avanços tecnológicos contínuos ocorridos no setor elétrico apontam para novas metodologias que visam solucionar problemas existentes na operação dos sistemas de potência para resultar no aumento de seus índices de confiabilidade. Por exemplo, no campo da física dos semicondutores, o desenvolvimento da família dos tiristores (e.g. SCR, GTO, SCS e outros) e de outros dispositivos eletrônicos (e.g. MOSFET, IGBT e outros) capazes de suportar valores de tensão e de corrente elevados, contribuem para implementação de novos equipamentos de alta tecnologia que processam fluxos de potência cada vez maiores, segundo Boylestad (1998), Ulith, (1976).

A tecnologia aplicada sobre o rotor da máquina, comparada com a tecnologia de conexão unitária, agrega uma parcela maior de benefícios, além de possuir flexibilidade o que o faz um forte concorrente para aplicações em novos empreendimentos e uma alternativa viável para a recapacitação de aproveitamentos existentes.

A utilização da máquina de dupla alimentação além de propiciar a desvinculação da velocidade de rotação mecânica da freqüência elétrica do sistema e ótimo benefício pelo aumento do rendimento do processo de conversão de energia, propicia a diminuição do lago do reservatório beneficiando o meio ambiente e aumenta a flexibilidade operacional.

Para evidenciar um pouco a viabilidade do que foi dito, a tabela 3.4 apresenta algumas das usinas hidráulicas com rotação ajustável em operação.

Tabela 3.4 – Usinas com Rotação Ajustável em Serviço

<b>Companhia Concessionária</b>	<b>Central Hidrelétrica</b>	<b>Número de Unidades</b>	<b>Entrada em Serviço</b>	<b>Capacidade de Geração (MVA)</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Faixa de variação de velocidade (r.p.m)</b>
TEPCO (JAP)	YAGISAWA	2	1990	85	Toshiba	130 - 156
HOKKAIDO(JAP)	TAKAMI	2	1993	140	Mitsubishi	208 - 254
KANSAI(JAP)	OHKAWACHI	2	1993	395	Hitachi	330 - 390
TEPCO(JAP)	SHIOBARA	3	1995	360	Toshiba	356 - 394
KANSAI(JAP)	OHKAWACHI	4	1995	395	Hitachi	330 - 390
TEPCO(JAP)	YAGISAWA	3	1996	85	Toshiba	130 - 156
EPDC(JAP)	OKUKIYOTSU	2	1996	345	Toshiba	408 - 450
TEPCO(JAP)	KAZUNOGAWA	1	2005	500	ND	500(síncrona)
KYUSHU(JAP)	OMARUGAWA	3	2005	340	Mitsubishi	576 - 624
ND(ALE)	GOLDISTHAL	2	ND	340,4 - 351,6	ND	300 - 346

Fonte: SAIDEL, 1995.

### 1.3 - Estado da arte.

Para grande parte das tecnologias já utilizadas, sempre foi preciso obter o melhor rendimento médio possível, tarefa relativamente complexa, principalmente no caso de instalações hidrelétricas, devido à variação estatística das características operativas da usina, como a variação da queda útil e da vazão.

Com a evolução tecnológica e a redução dos custos da eletrônica de potência, aumentaram as possibilidades da utilização da corrente contínua. Tal tecnologia oferece a possibilidade de desacoplar a frequência da tensão gerada da frequência do sistema e a geração elétrica passar a operar com rotação variável, diferentemente do modelo clássico que opera com rotação fixa. Segundo Santos (1976), este vínculo entre diferentes sistemas, que pode ser alterado com base na adição de conversores de frequência, já era conhecido na década de 70, e extensamente estudada na literatura técnica da área.

Mas, mesmo assim, a operação de usinas hidrelétricas com rotação diferente da síncrona é um tema pouco explorado na literatura técnica específica.

Sheldon (1983) aponta em seu trabalho que inicialmente a operação de usinas hidrelétricas em regime de rotação variável foi proposta como uma forma de regular o fluxo de água na turbina através da variação da abertura da porta de controle de vazão, permitindo, com isto, a redução de custos no regulador de velocidade das turbinas. Entretanto, esta proposição foi abandonada mais tarde em função da verificação da pequena sensibilidade de variação da descarga em relação à variação da rotação. A proposta então seguida foi a utilização da velocidade variável de modo a permitir à turbina operar com maior eficiência, em usinas onde há uma variação significativa da altura de queda.

O estudo de Sheldon (1983) também mostra que, sendo a turbina sempre operada com máximo rendimento, é possível um acréscimo de até 3% na geração de energia, utilizando 2% menos água.

Especialistas da área de eletrônica de potência buscaram formas para reduzir custos desta tecnologia através do acoplamento do sistema diretamente aos geradores, no esquema denominado conexão unitária. Na conexão unitária, é permitido efetuar uma ação no estator do gerador para que haja uma operação em rotação variável. Merouge e Denoncourt (1988) abordaram em seu trabalho, os geradores hidráulicos operando em velocidade variável em um sistema de transmissão HVDC.

No Brasil desenvolveram-se pesquisas na EPUSP, sob coordenação dos autores Galvão, Reis, Donha, Morishita, Ellery Filho (1991) para a conexão unitária em CCAT

operando em rotação variável, os quais também procuram apontar em seus estudos vantagens desta solução tecnológica para a questão amazônica.

Entidades internacionais como Naidu (1989), que apresenta os primeiros resultados sobre a operação da usina em rotação ajustável, na época ainda denominada variável, explorando a inexistência de vínculo entre a frequência de geração e de operação do sistema, além de Arrilaga (1992), atestam positivamente pela viabilidade da solução da tecnologia CCAT em rotação ajustável.

Westphalen e Mazzolent (1992) avaliaram o efeito da operação, em rotação ajustável para uma turbina Francis, de uma usina existente no Brasil. Este estudo considerou a fórmula de eficiência ponderada do projeto e comparou os modos de operação sob o ponto de vista da energia anual gerada. Considerou também, a altura de queda distribuída em três patamares: máximo, mínimo e nominal. Em todas as condições avaliadas, a operação em regime de rotação ajustável atinge seus valores de rendimento superiores àqueles obtidos para o regime de rotação fixa.

Saidel (1995) investigou as potencialidades de utilização da operação em regime de rotação ajustável em usinas hidrelétricas, e para isto, desenvolveu uma ferramenta computacional que representava as características operacionais, solicitações de carga, as formas de curvas de desempenho da turbina, para simulação de diversos tipos de usinas em rotação fixa e ajustável. O trabalho inovou ao focar a modelagem e a simulação de usinas reversíveis, estudo ainda incipiente no Brasil. A operação com variação de rotação é uma alternativa que apresentou maior ganho energético, maior rendimento das turbinas e, do ponto de vista ambiental, houve a possibilidade de redução da cota máxima do reservatório. As vantagens mostradas são aplicadas tanto em novos projetos, como na modernização, reabilitação e re-capacitação de usinas hidrelétricas.

Barros (1996), Donalek (1993), Stein (1992), Sheldon (1989) e Kerkman (1980) mostraram em seus estudos que além do aumento de eficiência nas turbinas hidráulicas, a operação com velocidade ajustável proporciona outros benefícios como: aumento da eficiência; aumento da geração; maior variação da altura da queda; redução de ruídos, vibrações e problemas de cavitação; re-potenciação de antigas usinas; simplificação na construção da turbina; resposta rápida à variação de carga; bombeamento ajustável em usinas reversíveis e regulação de frequência durante bombeamento.

Alencar (1999) estudou o comportamento de um modelo de turbina Francis e assegurou que tal turbina apresentava os maiores ganhos de rendimento para geração

hidroelétrica de energia operando em rotação ajustável, além de implementar uma metodologia para levantamento do diagrama de colina, ainda pouco conhecida nesta área.

Souza (2005) mostrou a possibilidade de intercâmbio de potência entre a “massa girante” e o sistema elétrico, fazendo com que a máquina de dupla alimentação possa injetar ou absorver potência ativa do sistema em um intervalo de tempo muito reduzido. Seu controle de geração de potência ativa através das correntes aplicadas pelos conversores do rotor possibilita a regulação de potência, tanto no modo motor como gerador, sem as constantes de tempo existentes nos geradores convencionais ajustados pela atuação das palhetas no distribuidor da turbina.

Os benefícios advindos da integração desta máquina, tanto para o sistema elétrico de potência, sistema hidroenergético, sistema mecânico e para o meio ambiente.

Wilhelmi, Fraile-Ardanuy, Fraile-Mora, Pérez e Sarasúa (2005 e 2006) mostram em seus trabalhos que as condições para operar em uma velocidade ótima devem ser continuamente ajustadas por meio de um sistema de controle apropriado. Esse processo possibilita mudanças dinâmicas nas operações variáveis. Uma rede neural artificial é usada para gerar uma velocidade de referência que visando otimizar a eficiência da turbina. Os resultados experimentais realizados confirmaram a obtenção de eficiência da geração através do ajuste da velocidade de rotação da turbina.

Fraile-Ardanuy, Wilhelmi, Fraile-Mora e Pérez (2006) descreveram o esquema de controle implementado baseado em redes neurais artificiais, sendo confirmada a validade através da simulação prática de operação desta tecnologia em sistemas de geração a fio d’água por alguns anos, confirmando os ganhos significativos obtidos. Citam como vantagens: maior flexibilidade de operação da turbina em situações fora da especificada no projeto (vazão e altura de queda diferente dos valores nominais).

A operação em velocidade variável, em condições adversas, diminuiu as cavitações. Um sistema de controle baseado em RNA tem sido desenvolvido para ajustar automaticamente a velocidade da turbina às condições de operação existentes. A viabilidade deste conceito tem sido demonstrada em um laboratório com o uso de conversores de frequência comerciais.

Sarasu, Fraile-Ardanuy, Perez, Wilhelmi, Sanchez (2007) propuseram um critério prático para ajuste de ganhos do controlador PI. A influência do ponto de operação da turbina nos ganhos do controlador é analisada. Os resultados são aplicados a um modelo típico de hidrelétrica para verificar que os ajustes do controlador PI permitem controle estável e



adequado do sistema. Foi apresentado um método para ajuste de um controlador PI nível da água hidrelétrica. O método proposto considera o ponto de funcionamento da turbina para ajustar os ganhos do regulador PI. Tem sido demonstrado que o ponto de operação da turbina, definida pela abertura das portas, tem uma influência significativa sobre a resposta. Quando o ponto de operação difere substancialmente do que foi escolhido para ajustar os ganhos do controlador, a resposta do sistema pode tornar-se instável, prejudicando a funcionalidade do sistema.

Lautier, O'Neil, Deschenes, Ndjana, Fraser, Leclerc (2007) mostraram a operação de uma turbina hidráulica em uma altura de queda muito pequena operando em velocidade variável com um baixo impacto ambiental

Breban, Ansel, Nasser, Robyns, Radulescu (2007) mostraram resultados experimentais de uma PCH isolada ou conectada à rede elétrica operando em velocidade variável.

#### **1.4 - Objetivos da dissertação**

Esta dissertação apresenta uma metodologia de obtenção de curvas de colina, as quais são fundamentais na modelagem das turbinas hidráulicas, utilizando para tanto as redes neurais artificiais a fim de aumentar a eficiência na geração de energia elétrica em sistemas hidráulicos. Estas soluções podem envolver a utilização dos geradores assíncronos duplamente excitados, chamados também de “doubly fed induction generators” (DFIG), os quais operam em esquemas de velocidade variável.

Além disso, buscam-se alcançar os objetivos específicos abaixo:

- 1- Caracterizar o estado da arte dos sistemas hidráulicos de velocidade variável, para fins de integração junto aos sistemas elétricos de potência;
- 2- Desenvolver modelos de turbinas hidráulicas nos esquemas de velocidade variável utilizando redes neurais artificiais, determinando as curvas de colina;
- 3- Desenvolver uma proposta de programa desenvolvido em ambiente computacional que facilite a aquisição das curvas de colina.

## 1.5 - Apresentação do trabalho.

Este documento está organizado da seguinte forma:

O Capítulo 1 apresenta uma contextualização do problema, com uma breve descrição da situação energética enfatizando a geração de energia hidráulica no contexto nacional e internacional, tanto no sistema clássico de operação em velocidade fixa, como o mais atual sistema em velocidade ajustável. Também será abordado o estado da arte para o estudo proposto que norteará os objetivos da pesquisa.

No capítulo 2 são apresentados os componentes básicos de uma usina hidrelétrica para fins de geração de energia elétrica, mostrando as classificações das usinas, descrevendo os principais tipos de turbinas hidráulicas e apresentando as tecnologias para geração de energia hidroelétrica de energia em velocidade ajustável.

No Capítulo 3 é explicado como é realizada a modelagem das turbinas hidráulicas através das curvas de colina mostrando algumas curvas reais e aplicações em determinados tipos de curvas em distintas turbinas hídricas.

No capítulo 4 é apresentado um breve estudo sobre redes neurais artificiais com particularidades sobre modelos de neurônios, algoritmo de aprendizagem e outras informações pertinentes ao desenvolvimento do presente trabalho.

No capítulo 5 é apresentada a metodologia proposta para obtenção das curvas de colina usando redes neurais artificiais deste trabalho, neste caso, o programa para determinação do Diagramas de Colinas chamado de *curvas\_colina\_rna*.

Tal programa culmina em resultados obtidos a partir de simulações realizadas a fim de mostrar sua eficácia.

Finalizando, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões finais do trabalho, com proposições para futuros trabalhos na área de pesquisa.

## **2 - GERAÇÃO HIDROELÉTRICA DE ENERGIA.**

### **2.1 – Introdução.**

A energia elétrica de origem hidráulica está entre as mais utilizadas em todo o mundo. Conforme a ANEEL (2002), usinas hidrelétricas são a segunda mais importante fonte de geração de energia elétrica do planeta, representando cerca de 20% de toda a eletricidade produzida na Terra.

O Brasil forma entre o grupo de países em que a produção de eletricidade é maciçamente proveniente de usinas hidrelétricas. Essas usinas correspondem a 75% da potência instalada no país, segundo a ANEEL (2006) e geraram, em 2005, 93% da energia elétrica requerida no Sistema Interligado Nacional – SIN, conforme ONS (2006).

Usinas hidrelétricas integradas a projetos de usos múltiplos da água podem favorecer outras funções de importância vital, como irrigação, abastecimento de água, transporte, controle de cheias, turismo, lazer, entre outros.

Neste capítulo pretende-se apresentar a composição de uma usina hidrelétrica, como são feitos os aproveitamentos hidráulicos através de usinas hidrelétricas, bem como os princípios e características que norteiam a operação hidroenergética dos reservatórios, além da tecnologia da geração em velocidade ajustável.

### **2.2 - Componentes Básicos de uma Usina Hidrelétrica.**

A energia hidráulica provém da irradiação solar e da energia potencial gravitacional. O sol e força da gravidade condicionam a evaporação, a condensação e a precipitação da água sobre a superfície da Terra. A gravidade faz, ainda, a água fluir ao longo do leito do rio e este movimento contém energia cinética, que pode ser convertida em energia mecânica e esta em energia elétrica, nas centrais hidrelétricas. A hidreletricidade é, assim, uma forma de energia renovável.

Uma usina hidrelétrica ou central hidroelétrica é um conjunto de obras e de equipamentos, que tem por finalidade produzir energia elétrica. Esta energia é produzida a partir do aproveitamento do potencial hidráulico de um curso d'água, combinando a utilização da vazão do rio, quantidade de água disponível em um determinado período de tempo, com os seus desníveis, sejam os naturalmente formados, como as quedas d'água, sejam os criados

com a construção de barragens. Assim, a potência hidráulica disponível em determinado local de um rio é dada pelo produto da vazão, a altura existente entre o reservatório, a montante, e o sistema de descarga, a jusante da barragem, e a aceleração da gravidade (SOUZA *et al.*, 1999).

Uma usina hidrelétrica é composta, basicamente, de barragem, sistemas de captação e adução de água, casa de força e vertedouros. Cada um dessas partes demanda obras e instalações que devem ser projetadas para um funcionamento conjunto. Segundo Tolmasquim (2005), simplificadamente, uma usina hidrelétrica é composta pelos seguintes elementos:

- **Barragem:** A barragem interrompe o curso normal do rio, formando, na maioria das vezes, um lago artificial conhecido como reservatório. A função da barragem é formar a queda d'água, quando não existe um desnível concentrado, e permitir a captação da água em um nível adequado.

Além de formar a queda, a barragem pode servir também para acumular água que pode ser usada na geração de energia nos períodos de maior estiagem, promovendo o controle das vazões naturais do rio. Trata-se, nesse caso, dos reservatórios de regularização, de grande importância estratégica. As usinas que não possuem essa capacidade de regularização são chamadas de usinas a fio d'água.

- **Vertedouro:** Também denominado de canal extravasador é outra importante estrutura que integra um aproveitamento hidrelétrico é o vertedouro. Sua função é permitir o extravasamento do excesso de afluência que não pode ou não interessa ser armazenada no reservatório ou gerada. Dito de outra forma, a finalidade do vertedouro é “descarregar as cheias para a manutenção do nível d'água de um reservatório em uma cota desejável” (ELETROBRÁS, 1997). É o componente mais popularizado de um aproveitamento hidrelétrico, não sendo rara a representação de uma usina por meio de imagens de vertedouros em operação.

- **Tomada D'água:** Conduz a água até a Câmara de Adução e/ou ao Conduto Forçado. A água captada no reservatório é levada até a casa de força através de túneis, canais ou condutos metálicos.

- **Casa de Máquinas ou de Força:** A casa de força abriga as turbinas, que convertem a energia cinética em mecânica, e os geradores, que convertem a energia mecânica em eletricidade. A água conduzida à turbina faz com que esta gire juntamente com um gerador a

ela mecanicamente acoplado, realizando as transformações das diversas formas de energia. Depois de passar pela turbina, a água é restituída ao leito natural do rio, através do que se convencionou chamar de canal de fuga.

Há vários tipos de casa de força. Existem dois tipos de casas de força, abrigada e subterrânea. No Brasil, a mais comum é a do tipo abrigada, em que todo o conjunto turbina-gerador e equipamentos acessórios são instalados dentro de uma estrutura.

### **2.3 - Classificações das Centrais Hidroelétricas.**

Uma central geradora é composta pela máquina geradora e por um número de outros equipamentos necessários à sua utilização. Baseado nesta definição, define-se central hidroelétrica como o tipo de central geradora que utiliza uma máquina hidráulica para geração de energia elétrica.

A transformação da energia hidráulica (potencial gravitacional, de pressão e cinética) em energia elétrica, realizada num conjunto (Turbina hidráulica+gerador), exige que se disponha de certa vazão de água, gerada por um desnível entre dois reservatórios conhecidos como reservatório de adaptação e reservatório de descarga. Nas centrais instaladas em rios, este desnível pode ser natural, devido à topografia do terreno, ou artificial, criado pelo uso de uma barragem.

Há diversos critérios segundo os quais as centrais hidroelétricas instaladas em rios podem ser classificadas. Algumas classificações encontradas na literatura e que serão estudadas separadamente, a seguir, são as seguintes:

- Quanto ao tipo do reservatório;
- Quanto à queda;
- Quanto à potência.

#### **2.3.1 - Quanto ao Tipo do Reservatório.**

São classificadas em:

- Centrais com reservatório de regularização (ou de acumulação);
- Centrais com reservatório de captação (ou a fio d'água ou de água corrente);
- Centrais de acumulação por bombeamento (ou usinas reversíveis).

As centrais hidrelétricas possuem algum tipo de reservatório, criado por uma barragem artificial. As centrais que possuem grandes reservatórios, com capacidade de regularização anual ou plurianual da vazão do rio, são chamadas centrais com reservatório de regularização. É o caso da maioria das centrais brasileiras, como a de Itaipu, a de Paulo Afonso e a de Tucuruí. As que possuem reservatórios com capacidade inferior, são chamadas centrais com reservatório de captação.

Nas centrais com reservatório de captação, toda água que chega ao reservatório e não é utilizada, escoar sobre vertedouros e é perdida, do ponto de vista energético, junto com a potência que seria gerada a partir dela. Nos períodos de seca, pode ser necessário tirar uma ou mais turbinas de operação em centrais deste tipo, o que resulta num fornecimento irregular de energia durante o ano. A figura 2.1 mostra uma central com reservatório de captação.



Figura 2.1 – Central hidroelétrica com reservatório de captação: Luiz Carlos Barreto Carvalho (antiga central de Estreito), próximo de Franca, SP (EPE, 2006a).

As usinas reversíveis, também denominadas de usinas de acumulação por bombeamento ou usinas de transferência, mostrada na figura 2.2, permitem o armazenamento de energia hidráulica a partir do aproveitamento do excedente de eletricidade. O sistema é composto de dois reservatórios, um superior e um inferior. Quando existe falta de potência na rede de distribuição, a central opera gerando energia com a água escoando do reservatório superior para o inferior. Quando existe sobra, a central opera bombeando água no sentido contrário, para armazenar energia a ser utilizada no subsequente período de falta.

Durante o horário fora de pico, a água é bombeada do reservatório inferior para o superior. Quando necessário, a água que se encontra no reservatório superior será utilizada para gerar energia elétrica a partir da queda. A sobra de energia, isto é, água, em usinas hidrelétricas convencionais pode ser utilizada em períodos de baixa carga, no período da

noite, para armazenar água no reservatório superior da usina reversível. Em períodos de ponta, a água armazenada, acrescida de uma eventual vazão afluyente, pode ser turbinada, gerando-se energia elétrica para suprir ou auxiliar o suprimento da ponta de carga do sistema. Em outras palavras, as usinas reversíveis permitem o aproveitamento de parte da energia que seria vertida e a redução dos custos necessários ao atendimento da ponta de carga do sistema.

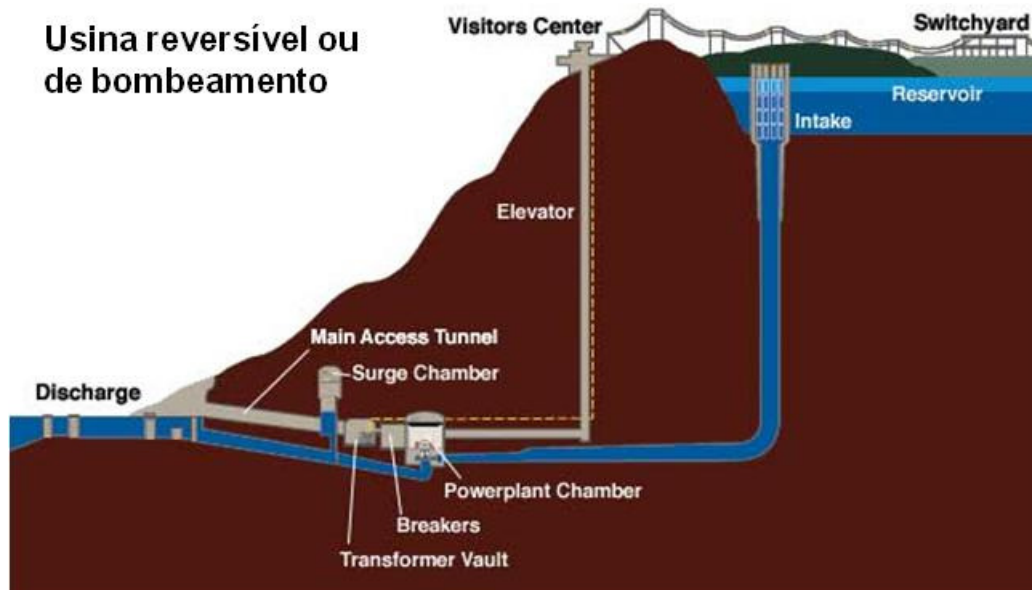


Figura 2.2 – Esquema de uma central hidroelétrica de acumulação por bombeamento.

Fonte: <http://sustentabilidade.allianz.com.br/?676/Perfil-da-energia-hidrica>

A energia utilizada no processo de bombeamento não pode ser completamente recuperada na operação de geração devido às perdas nos motores, bombas, tubulações, turbinas, geradores, etc. Por outro lado, o custo da energia em períodos de carga leve é menor que o custo em períodos de ponta, em função da própria curva de demanda do sistema.

As usinas reversíveis são uma alternativa atraente para a ampliação da capacidade do sistema elétrico, pois são particularmente interessantes para sistemas com baixo fator de carga e com grande base hidráulica como é o caso brasileiro.

Nos sistemas interligados brasileiro as usinas reversíveis podem ter destacada importância, permitindo aumentar a flexibilidade de operação desses sistemas. Esta flexibilidade facilitaria a transferência do excesso de energia entre regiões e proporcionaria uma distribuição geográfica mais adequada dos estoques de energia hidráulica armazenada nos reservatórios.

As primeiras usinas reversíveis foram utilizadas na Itália e Suíça na década de 1890. A partir de 1933 as usinas reversíveis passaram a utilizar os motores-geradores.

As usinas reversíveis representam cerca de 3% da capacidade de geração no mundo e estas usinas são caracterizadas pelo longo tempo de construção e alto investimento inicial.

Na figura 2.3 é mostrada a usina de Yanbaru (Okinawa Seawater Pumped Storage - Japão), de 30 MW, que é a primeira a usar o mar como reservatório de jusante.



Figura 2.3 – Usina reversível de Yanbaru, Japão. (EPE, 2006d).

Tipicamente, a relação entre a energia gerada e a energia consumida no bombeamento é de  $2/3$ , embora nas usinas mais modernas já se obtenha rendimento próximo a 75% (usina de Tongbai, China, de 1.200 MW, em construção com financiamento do Banco Mundial).

As usinas reversíveis apresentam quedas elevadas, frequentemente superiores a 600 m como Tianhuangping (607m), Kanagawa (653m), Xilongchi (703m), e Kazunogawa (714m). Usinas desse tipo são destinadas exclusivamente ao atendimento da ponta de carga do sistema elétrico, razão pela qual tem baixo fator de capacidade, frequentemente entre 9% e 18%, e alta velocidade de tomada de carga.

Algumas usinas passam da operação de bombeamento para a geração máxima em apenas 2 minutos e da condição de *standby* à plena carga em 12 segundos (Dinorwig, 1.728 MW, queda bruta de 600m). Se localizadas próximo aos centros de consumo, podem trazer



benefícios adicionais, como o investimento evitado no sistema de transmissão, dimensionado para atender o horário de maior consumo no sistema.

As usinas reversíveis são parte significativa do parque gerador de diversos países e vem tendo utilização crescente particularmente na China e Japão [EPE, 2006c].

De acordo com o último plano de longo prazo do setor elétrico, o Plano 2015 (ELETROBRÁS, 1994), ainda não se construiu nenhuma usina reversível no Brasil em razão de as usinas hidrelétricas virem sendo dimensionadas de tal forma que sua potência instalada é suficiente para atender à demanda na ponta. Adicionalmente, contribuiu para reduzir essa demanda nos últimos 20 anos a adoção das tarifas horo-sazonais, que criaram incentivos para os consumidores de maior porte deslocarem ou reduzirem seu consumo do horário de ponta. As interligações regionais também contribuíram para melhor atendimento da ponta com o sistema existente, pela possibilidade que oferecem de aproveitar não só a diversidade hidrológica, como a diversidade do consumo.

A tendência de aproveitamento do potencial hidrelétrico da Região Amazônica pode trazer novos elementos à estratégia da oferta, tendendo a favorecer usinas reversíveis.

### **2.3.2 - Quanto ao regime operativo dos reservatórios.**

Uma das classificações mais comuns que se faz para usinas hidrelétricas está relacionada ao regime operativo de seus reservatórios. Há dois tipos básicos de reservatórios: de acumulação e a fio d'água.

Nas usinas cujos reservatórios operam a fio d'água, o objetivo principal na formação do lago é maximizar a altura de queda disponível para geração. Assim, o nível d'água normal operativo do reservatório, e, por conseqüência, o volume acumulado e a área alagada, permanece praticamente invariante ao longo do tempo, independentemente da vazão afluyente ao reservatório, mas, na verdade, mesmo usinas a fio d'água possuem alguma capacidade de regularização. Nesses casos, a regularização é diária ou mensal, em algumas vezes pouco superior à mensal. São exemplos de usinas a fio d'água no sistema elétrico brasileiro as Usinas de Estreito, no Rio Grande, de Xingó, no Rio São Francisco e de Itaipu, no Rio Paraná.

A quantidade de energia gerada dependente exclusivamente do regime hidrológico do rio (vazão afluyente, natural ou regularizada) ao local do barramento e os benefícios energéticos (contribuição de energia para o sistema) se realizam exclusivamente na própria

usina. Em uma cascata de aproveitamentos hidrelétricos em um mesmo curso d'água, usinas a fio d'água tendem a se localizar nas partes média e baixa do rio.

Conforme a EPE (2006), ao final de 2005 eram operadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS um conjunto de usinas hidrelétricas a fio d'água que perfazia uma potência instalada de 30.745 MW.

a) A rotação ajustável em usinas a fio d'água.

As usinas a fio d'água não dispõem de bacia de acumulação de relevância e utilizam a vazão proporcionada imediatamente pelo rio, como abordado por Macintyre (1983). Desta forma, estas usinas caracterizam-se por pequena ou nenhuma variação do nível d'água no reservatório, a montante.

Como a variação é proporcionada pela sazonalidade de vazões afluentes, que podem gerar um excedente de água ou vazões menores em períodos secos, haverá uma diminuição do rendimento, pois a operação será diferente das condições estabelecidas no projeto. Mas Reis (1993) mostra que com o ajuste da rotação, será ampliada a potência máxima extraível de um aproveitamento, para uma mesma altura de queda.

Nas usinas de acumulação, o reservatório tem também a função de estoque regularizador, de modo que o volume d'água do lago formado e, por conseqüência, o nível e a área alagada, podem variar de acordo com a maior ou menor necessidade de geração de energia. A quantidade de energia gerada depende não apenas do regime hidrológico do rio (vazão afluente), mas também do volume d'água acumulado. Os benefícios energéticos se realizam não apenas na própria usina, mas também nas demais usinas a jusante, que se beneficiam da regularização da vazão do rio proporcionada pela operação do reservatório a montante.

A definição do regime operativo dos reservatórios das usinas localizadas em uma mesma bacia hidrográfica é feita ainda na fase dos estudos de inventário e tem por objetivo principal a maximização dos benefícios energéticos proporcionados pelo conjunto dos reservatórios, observadas as restrições de caráter ambiental.

Após caracterizar o reservatório é que são estabelecidos a motorização da usina (potência instalada), o número de unidades geradoras e as alturas quedas de projeto e referência, parâmetros definidores do projeto das turbinas.

No final de 2005, as usinas com reservatório de regularização plurianual totalizavam uma potência instalada de 40.515 MW, segundo a EPE (2006).

b) A rotação ajustável em usinas de acumulação.

Boa parte das usinas hidrelétricas brasileiras são providas de reservatórios de acumulação. Tais reservatórios possibilitam o acúmulo de água oriunda das vazões afluentes e a regularização da vazão defluente, permitindo maior controle sobre as características da energia gerada e alguns casos sobre o abastecimento de água.

Operacionalmente, estas usinas apresentam altura de queda variável, em função da sazonalidade do regime de vazões e das características físicas dos reservatório, podendo operar por longos períodos fora da região de máximo rendimento da turbina.

Segundo Sheldon (1983), para estas turbinas, quanto maior for a variação da altura líquida de queda ao longo do ciclo considerado, maiores serão os ganhos potenciais advindos da utilização da rotação ajustável.

c) A rotação ajustável em usinas reversíveis.

Uma avaliação comparativa de sistemas de armazenamento existentes mostra que, com um rendimento global de mais de 85%, os sistemas convencionais de bombeamento é a solução mais adequada para o armazenamento de grande escala de energia elétrica em períodos de demanda de ponta do sistema. No entanto, a eficiência e a flexibilidade de operação dessa forma de armazenamento convencional de bombeamento que opera à velocidade constante podem ser sensivelmente aumentadas usando sistemas de velocidade variável.

Essa moderna tecnologia de velocidade variável requer um sistema eletrônico de conversão de energia, um equipamento de controle de alto desempenho e um desenho especial do motor-gerador e da bomba-turbina. Entre as diversas soluções possíveis, o sistema com um gerador assíncrono duplamente alimentado, alimenta o rotor, quer por cicloconversor ou por um conversor GTO oferece melhores performances elétricas e hidráulicas em termos de: controle de potência ativa em modo de bombeamento com ótima eficiência - controle de potência reativa no ponto de interligação da rede - uma resposta rápida de potência ativa (controle de frequência) - não há necessidade de dispositivos complementares para operar a bomba - melhoria da eficiência hidráulica - aumento da carga de funcionamento e da altura de queda de operação neste modo de operação.

O principal objetivo desta contribuição é para ilustrar os benefícios que podem ser esperados em termos desempenho e estabilidade da rede elétrica, utilizando a velocidade

ajustável em esquemas de bombeamento. Esses benefícios têm que ser considerados e avaliados na comparação entre os respectivos custos de investimento de um sistema convencional ou em velocidade ajustável.

Em comparação com um motor-gerador convencional operando a uma velocidade constante, um sistema de bombeamento em velocidade ajustável não tem apenas a vantagem de uma maior eficiência global, mas também oferece os seguintes benefícios para a rede elétrica: Possibilidade de controle de potência ativa no modo de bombeamento; Possibilidade de controle de potência reativa no ponto de interligação; Possibilidade de injeção de potência ativa instantânea na rede por redução da velocidade e utilização da energia cinética armazenada na massa girante.

Estas possibilidades de conduzir a uma melhoria muito sensível da qualidade da rede em termos de desempenho e estabilidade.

### 2.3.3 - Quanto à Queda Bruta (em m):

Antes de tudo, é preciso definir o que se entende por queda bruta, um conceito que será explicado com mais detalhes no próximo capítulo. Entende-se como queda bruta, a diferença de alturas topográficas entre os reservatórios de captação e de descarga de uma central.

Entre as centrais de alta queda pode-se citar a de Laures, Itália, instalada em uma queda bruta de 2.030 m. No outro extremo da escala, há a central de Nagahamadi, Egito, que utiliza uma queda variando de 2,4 a 4,4 m. Na figura 2.4 abaixo, é mostrado o exemplo de duas centrais hidrelétricas.



Figura 2.4 – Central hidrelétrica de Porto Colômbia e Central de Henry Borden, Cubatão, SP (EPE, 2006d).

Um limite superior de altura para o aproveitamento hidroelétrico teoricamente não existe. Quedas muito alta podem ser aproveitadas, utilizando-se centrais intermediárias construídas ao longo da queda. À medida que as quedas vão diminuindo o percentual de energia consumido por atrito hidrodinâmico vai aumentando. Eventualmente, é atingido um ponto em que a central torna-se economicamente inviável, devido à sua baixa eficiência. Este limite, entretanto, depende da tecnologia utilizada. Atualmente, é inviável aproveitar quedas abaixo de 2 m.

É interessante, contudo, observar que os limites da classificação não são rígidos. Eles variam com o tempo, à medida que a tecnologia avança e também (consideravelmente) de autor para autor.

### **2.3.4 - Quanto à potência (em MW):**

Os limites deste critério também não são rígidos; variando de acordo com o autor e com a região considerada. Além disso, uma central que nos anos 50 seria considerada grande, hoje em dia pode ser considerada média, pois as potências cresceram mais de mil vezes ao longo do século XX.

#### **a) Micro e Mini central.**

Os micros aproveitamentos hidroenergéticos são aqueles que disponibilizam potência útil de 1 kW a 100 kW e os Mini de 100 kW a 1000 kW. De acordo com Santos (2003), atualmente, o perfil daqueles que desenvolvem esse tipo de aproveitamento é caracterizado pelo isolamento da unidade consumidora, não tendo outra forma de suprimento, estando muito distante da rede convencional de energia elétrica, como por exemplo, a figura 2.5 que mostra uma microcentral instalada em Boa Esperança - MG.

Não se tem, atualmente, um censo que determine o estado geral das microcentrais no Brasil. O fato é que elas são operadas, em sua maioria, por autoprodutores para fins de consumo próprio e normalmente estão associadas a empreendimentos agroindustriais resultando no aumento da produtividade no campo, permitindo a melhoria das condições de trabalho e elevando as condições de vida do homem no meio rural.

Segundo Stano (2002), estima-se que haja hoje mais de 1.000 minicentraís e microcentrais com potências médias de 300kW, entre centrais desativadas e em funcionamento.



a) Conduto forçado e casa de máquinas

b) Tomada d'água e canal de adução

Figura 2.5 – Microcentral hidrelétrica Boa Esperança em MG. a) Conduto forçado e casa de máquinas;

b) Tomada d'água e canal de adução (Viana & Viana, 2004).

### **b) Pequenas centrais hidrelétricas – PCH.**

A inserção das Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCH, no Brasil se deu no final do século passado, onde se pode citar como marcos histórico o ano de 1883 quando se deu a instalação do primeiro aproveitamento hidrelétrico na mineração Santa Maria em Diamantina, denominado “Ribeirão do Inferno” e o ano de 1889, quando foi instalada a Usina Bernardo Mascarenhas: primeira hidrelétrica de porte, com 250 kW para atender à sua indústria têxtil e alimentar a iluminação residencial de Juiz de Fora, constituindo o que poderia ser denominado como a primeira empresa de energia elétrica para serviço público.

Nesta época ainda existia uma predominância pela energia térmica para o suprimento das grandes cidades, porém já na virada do século alguns dos principais estados (Bahia, Espírito Santo, Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo e Santa Catarina) reverteriam esta posição colocando a energia hidrelétrica como predominante.

Na primeira metade do século XX, as PCHs instaladas visavam, principalmente, atender sistemas isolados nos Estados e foram construídas por pequenos empresários da época ou pelas prefeituras municipais. Este processo teve uma rápida expansão no período 1920/1930, onde o número de empresas passou de 306 para 1.009, todas em geral, operando pequenos aproveitamentos hidrelétricos.

Este crescimento continuou até a década de 40, porém em taxas menores que nas décadas anteriores. Em 1941, existiam milhares de empresas de energia elétrica, e centenas de pequenas centrais, entretanto, tirando os grupos estrangeiros existentes, somente oito empresas possuíam potência instalada superior a 3.000 kW.

A definição de PCH na primeira edição do Manual da ELETROBRÁS/DNAEE (1982), diz que uma usina hidrelétrica era considerada como uma PCH quando:

- a potência instalada total estivesse compreendida entre 1,0 MW e 10 MW;
- a capacidade do conjunto turbina-gerador estivesse compreendida entre 1,0 MW e 5,0 MW;
- não fossem necessárias obras em túneis (conduto adutor, conduto forçado, desvio de rio, etc.);
- a altura máxima das estruturas de barramento do rio (barragens, diques, vertedouro, tomada d'água, etc.) não ultrapassasse 10 m;
- a vazão de dimensionamento da tomada d'água fosse igual ou inferior a 20 m<sup>3</sup>/s.

Na década de 1980, o Governo Federal procurou incentivar a implantação de pequenas centrais através do Programa Nacional de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PNPCH) do Ministério de Minas e Energia - MME promovendo estudos, cursos, subsídios técnicos e legais para o desenvolvimento do assunto. Mesmo considerando que o programa foi criado visando a autoprodução e ao atendimento aos mercados isolados do Norte do país, pouca coisa se efetivou devido a vários motivos, entre eles:

- i. a opção pela geração em grandes blocos de energia;
- ii. o cenário econômico nacional de recessão na década 1984/1993;
- iii. a ciranda financeira com altas taxas de juros penalizando atividades produtivas;
- iv. a inexistência de déficit de energia durante a crise econômica, além da opção pela extensão de sistemas de transmissão associados aos baixos níveis de tarifas de energia elétrica praticadas pelas concessionárias de distribuição;
- v. as vantagens relativas das alternativas térmicas com grupos geradores mais baratos e o preço do petróleo internacionalmente estabilizado.

Mas nos anos de 1996 e 1997, o Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE, atualmente ANEEL, criou um grupo multi-institucional para realizar um diagnóstico da situação e implementar um segundo plano nacional de pequenas centrais hidrelétricas. Entre as conclusões contidas no documento final, duas eram relevantes: (i) o aumento da potência limite e, (ii) a criação de novos procedimentos levando em consideração as

alterações que vinham sendo realizadas no ambiente institucional do setor elétrico, em especial, a criação do *produtor independente de energia elétrica*. É importante salientar que, até esse momento o DNAEE poderia realizar tal modificação na definição, pois era uma portaria emitida por esse órgão que definia as características de potência. É relevante citar também a recomendação da Coopers & Lybrand – empresa consultora contratada pelo MME dentro do processo de reestruturação do setor elétrico – para que a potência das pequenas centrais fosse elevada para 50 MW e que a outorga fosse concedida através de uma autorização, sem necessidade de processo licitatório.

No final do ano de 1997, por meio de sucessivas Medidas Provisórias, o limite para autorização, no caso de centrais hidrelétricas, foi sendo aumentado de 10 MW para 25 MW, sendo que, em 1998, a Lei no 9.648, de 27 de maio, fixou finalmente esse limite em 30 MW, através de uma alteração no artigo 26 da Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996.

A última alteração nos critérios de enquadramento de PCHs no Brasil ocorreu em 2003, com a publicação da Resolução da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL nº 652, que revoga a Resolução nº 394, de 1998. Nesta Resolução foram mantidos os demais critérios de enquadramento, porém o limite de área de reservatório foi, inadvertidamente flexibilizado para até 13 km<sup>2</sup>, desde que atendida a seguinte inequação:

$$A \leq \frac{14,3.P}{H_b}$$

Sendo:

A = área do reservatório em (km<sup>2</sup>);

P = potência elétrica instalada em (MW);

H<sub>b</sub> = queda bruta em (m), definida pela diferença entre os níveis d'água máximo normal de montante e jusante.

Dados os atuais critérios das PCH classificadas quanto à potência instalada e quanto à queda de projeto, como mostrado na Tabela 2.3, adiante, consideram-se os dois parâmetros conjuntamente, uma vez que um ou outro isoladamente não permite uma classificação adequada, não caracterizando o tipo de usina.

Para as centrais com alta e média queda, onde existe um desnível natural elevado, a casa de força fica situada, normalmente, afastada da estrutura do barramento. Conseqüentemente, a concepção do circuito hidráulico de adução envolve, rotineiramente, canal ou conduto de baixa pressão com extensão longa. Para as centrais de baixa queda,



todavia, a casa de força fica, normalmente, junto da barragem, sendo a adução feita através de uma tomada d'água incorporada ao barramento.

Veja na tabela 2.2 um quadro de classificação de Pequenas Centrais Hidrelétricas quanto à potência instalada e quanto à altura de queda do projeto.

Tabela 2.2 – Classificação das PCH quanto à potência e quanto à queda de projeto

CLASSIFICAÇÃO DAS CENTRAIS	POTÊNCIA - P (KW)	QUEDA DE PROJETO - H <sub>p</sub> (m)		
		BAIXA	MÉDIA	ALTA
MICRO	P < 100	H <sub>p</sub> < 15	15 < H <sub>p</sub> < 50	H <sub>p</sub> > 50
MINI	100 < P < 1.000	H <sub>p</sub> < 20	20 < H <sub>p</sub> < 100	H <sub>p</sub> > 100
PEQUENAS	1.000 < P < 30.000	H <sub>p</sub> < 25	25 < H <sub>p</sub> < 130	H <sub>p</sub> > 130

Fonte: ANEEL, 2003.

Segundo Souza (2005), a retomada das centrais de pequeno porte se deu com a crise energética de 2001 e com a desverticalização das empresas de energia no final da década de 90. A criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA, legitimada por meio da Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002 foi o grande incentivador para o crescimento das pequenas usinas hidráulicas, além de outras ações conjugadas com alguns incentivos introduzidos na legislação.

#### 2.4 - Recapitação e modernização.

O grande impulso da expansão hidrelétrica no Brasil ocorreu entre os anos 70 e 90, portanto há mais de 20 anos. De fato, cerca de dois terços da capacidade instalada existente ao final de 2004 já estava em operação antes de 1990, segundo a EPE (2005). Ao longo do horizonte do estudo do PNE 2030, esse “envelhecimento” do parque hidrelétrico nacional tende a se converter em uma preocupação nova no país.

Não por acaso, uma ação que vem crescentemente despertado a atenção e merecido estudos específicos é a de recapitação e modernização das usinas hidrelétricas existentes. Além de revitalizar os equipamentos mecânicos, ações nessa direção constituem uma oportunidade para auferir ganhos de rendimento.

Santos, Coelho e Dias (1999) citam alguns resultados práticos, com ganhos em potência ativa, em relação à capacidade original, de 5 a 60%, estimulando os autores a propor uma metodologia geral de avaliação da viabilidade da recapitação e modernização de usinas hidráulicas.

Chaves et al. (1997) apresentam um estudo da CESP, desenvolvido com o objetivo de avaliar alternativas para minimizar o risco de déficit na ponta, para a repotenciação de algumas máquinas. Os resultados indicados são considerados bons, tendo em vista o baixo custo e reduzido tempo de implantação de projetos dessa natureza.

Bermann et al. (2004) são bastante otimistas e estimam ganhos de 868 a 8.093 MW no parque hidrelétrico brasileiro com a repotenciação de usinas com mais de 20 anos de operação, com investimentos entre R\$200 e R\$600/kW instalado.

É inegável que a recapitação e a modernização do parque existente é uma ação necessária. Deve-se ter em vista, contudo, que seu principal benefício, não negligenciável, por suposto, é a recuperação e a manutenção da produção da instalação. Ganhos de energia são marginais, até porque, como já assinalado, o rendimento da conversão de energia na hidreletricidade é, já, bastante elevado. Isso quer dizer que ações de recapitação e modernização de usinas existentes não configuram alternativa relevante para compor a expansão da oferta de energia elétrica no país. Com efeito, não agregam energia “nova” em volumes significativos.

## **2.5 – Conclusão.**

Foram apresentados os componentes básicos de uma usina hidrelétrica para fins de geração de energia elétrica, mostrando as classificações das usinas, descrevendo os principais tipos de turbinas hidráulicas e apresentando as tecnologias para geração de energia hidroelétrica de energia em velocidade ajustável. Para as distintas classificações vistas, será dada atenção maior para usinas à fio d’água aplicadas em mini, micro e pequenas centrais hidrelétricas, tanto para novas construções, como para recapitação e modernização de usinas.

### **3 - MODELAGEM DE TURBINAS HÍDRICAS E DIAGRAMAS DE COLINA.**

#### **3.1 – Introdução.**

As turbinas hidráulicas são equipamentos que convertem a energia cinética proveniente da água em mecânica. Seu eixo transmite essa energia mecânica para os geradores que por sua vez transformam essa energia em eletricidade. Essa energia produzida tem um determinado rendimento de acordo com as condições operativas de instalação. Para obter as características das turbinas e neste sentido buscar uma operação com uma máxima eficiência, é necessário modelá-la através de diagramas de colina ou curvas de eficiência. Neste capítulo será visto como é realizada a modelagem das turbinas na sua forma tradicional feita de forma manual.

#### **3.2 - Tipos de Turbinas.**

A grande variedade de combinações de alturas e descargas em instalações hidrelétricas, possibilita um grande número e uma considerável variação das dimensões das turbinas. Existem vários tipos de turbinas hidráulicas, adequados à queda e à vazão disponíveis, com eficiências que podem chegar a 90%, segundo a ANEEL (2002). A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT classifica as turbinas em dois tipos:

a) Turbinas de reação: Segundo a TB-74 da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, turbinas de reação são aquelas em que o trabalho mecânico é obtido pela transformação das energias cinética e de pressão da água em escoamento, através do elemento do sistema rotativo hidromecânico (rotor). Essas turbinas são as mais usuais e cobrem uma faixa maior de alturas para as instalações hidrelétricas (1,5 a 300 m). Elas podem ser subdivididas em: pás ajustáveis (Kaplan) e pás fixas ou axial radial (Francis). Nas turbinas de reação a caixa espiral tem a função de guiar a água totalmente e uniformemente por toda a circunferência através do distribuidor. O distribuidor tem o objetivo de dirigir a vazão de água diretamente para a roda e, regular a descarga através da turbina. O tubo de sucção, nos mais diferentes tipos, reduz a velocidade da água na saída da turbina. Cada turbina pode ser dividida, também, dependendo da sua velocidade específica, podendo ser, de baixa, média ou de alta velocidade.

b) Turbinas de ação: Segundo a TB-74 da ABNT, turbinas de ação são aquelas em que o trabalho mecânico é obtido pela transformação da energia cinética da água em escoamento, através do elemento do sistema rotativo hidromecânico (rotor). Essas turbinas são operadas sobre pressão atmosférica por um jato livre. A altura encontrada é convertida em velocidade de queda ( $v = K_v \sqrt{2gH}$ ), com  $K_v$  variando entre 0,97 e 0,985. Elas podem ser subdivididas em: conchas fixas (Pelton), jatos inclinados ou jatos duplos. Nas turbinas de ação a água não passa por toda a circunferência da roda, mas através dos jatos. As turbinas do tipo Pelton são um exemplo de turbinas de ação.

A tabela 3.1 a seguir, mostra uma classificação das turbinas hidráulicas em função da classe à que pertence.

Tabela 3.1- Classificação das Turbinas Hidráulicas

CLASSES	REAÇÃO			AÇÃO		
	Axial		Francis (Axial- Radial)	Pelton	Jato Inclinado	Jato Duplo
Sistemas	Kaplan (pás ajustáveis)	pás fixas				
Limites De Aplicação	H = 2-70 m  D <sub>1</sub> = 1,0 a 10,0 m  N > 250.000 kW	H = 2-70 m  D <sub>1</sub> = 0,35 a 9,0 m  N > 150.000 kW	H = 30- 450 m (grandes) H = 2- 200 m (pequenas)  D <sub>1</sub> = 0,35 a 7,5 m  N > 500.000 kW	H = 300- 1700 m (grandes) H = 40- 250 m (pequenas) D <sub>1</sub> = 0,36 a 5,2 m  N > 110.000 kW	H=30- 400 m     N= 10- 4000 kW	H=10- 60 m     N=10-150 kW

Fonte: FILHO, 1998.

O desempenho das turbinas hidráulicas é fortemente influenciado pelos efeitos de inércia e compressibilidade da água e pela elasticidade das paredes da tubulação forçada, principalmente nas tubulações de grande comprimento. A inércia da água provoca variações no fluxo da turbina atrasadas em relação às variações na abertura das comportas e a elasticidade das paredes cria ondas viajantes de pressão e fluxo na tubulação forçada.

A Figura 3.1 apresenta reproduções de fotos dos vários tipos de turbina.

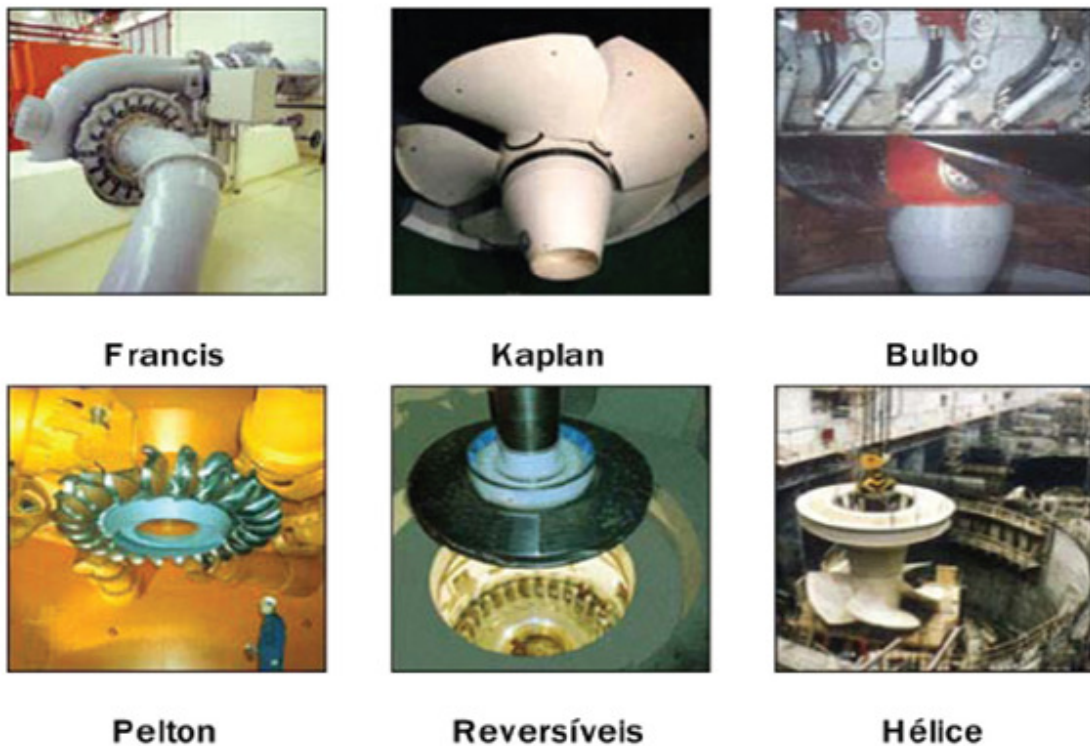


Figura 3.1 – Tipos de turbinas (GE Power, 2006).

#### a) Turbinas Francis.

A turbina do tipo Francis é a mais eficiente, isto é, é a que mais agrega ganhos, na aplicação da geração hidráulica em velocidade ajustável, sendo assim sempre que se referir a uma turbina entende-se como do tipo Francis a não ser que seja explicitado o contrário (SOUZA, 2005).

Contudo, se essa variação de  $H$  e  $Q$  modificou a velocidade,  $n$ , a eficiência poderia ser otimizada para oferecer melhores condições de operação.

Além disso, o ajuste da velocidade evitaria outros problemas que surgem quando variações da altura são excessivos, provocando oscilações da pressão de ar no tubo e cavitações (MERINO et al., 1996).

Um tipo de turbina flexível é a Francis, de reação, usada em alturas de queda líquidas (altura de queda bruta deduzida das perdas no circuito hidráulico) entre 20 e 750m (GE, 2006).

Também são adequadas à baixa queda as turbinas bulbo, que podem atingir, hoje, mais de 50 MW de potência unitária. São usadas em locais com quedas de 5 a 20m (GE, 2006). Parecem ser as mais adequadas a vários aproveitamentos na Amazônia brasileira, onde há baixa queda e grande fluxo de água, por permitirem minimizar a área alagada (No projeto das hidrelétricas de Santo Antonio e Jirau, no Rio Madeira, considera-se a instalação de turbinas bulbo com 70 MW de potência unitária, operando em uma queda de cerca de 20m. A relação área alagada por potência instalada desses aproveitamentos é calculada em 0,11 km<sup>2</sup>/MW (EPE, 2006).

#### **b) Turbinas Propeller e Kaplan.**

A dupla regulação da Turbina Kaplan permite manter altos valores de eficiência em uma larga escala de valores de altura e vazão. A Turbina Propeller possui pás fixas que oferece custos consideravelmente menores do que a Turbina Kaplan (Barros, et al., 1996).

Contudo, a eficiência diminui radicalmente para valores de carga fora da escala da vizinhança da potência nominal. Como visto anteriormente, a operação em velocidade ajustável da Turbina Propeller aumenta a performance, embora mantendo abaixo da turbina Kaplan

Além disso, em algumas configurações de sistemas seria possível operar sem a porta do distribuidor, com a regulação fornecida pela velocidade.

Então, a operação em velocidade ajustável da turbina Propeller deve ser uma boa alternativa comparada à turbina Kaplan devido à sua maior simplicidade de construção e robustez, enquanto ainda mantém uma boa performance.

Tradicionalmente, são utilizadas em aproveitamentos hidrelétricos de baixa queda (10 a 70m), turbinas do tipo Kaplan, de reação, assim classificadas porque há queda de pressão no rotor (GE, 2006).

Em locais de baixa queda (10 a 70m), tradicionalmente se usam as turbinas Kaplan, também de reação (GE, 2006)(Turbinas desse tipo são as mais comuns no parque hidrelétrico brasileiro. É a usada, por exemplo na Usina de Itaipu, com potência nominal de 700 MW e altura de queda líquida de 110m. Está sendo usada também na Usina de Três Gargantas, na China, com 710 MW e altura de queda líquida de 80m (GE, 2006).

### c) Turbinas Bulbo

A morfologia da região amazônica, onde se concentra a maior parte do potencial hidrelétrico a aproveitar, sugere usinas hidrelétricas de baixa queda e elevada vazão turbinada. Isso significa a aplicação de turbinas de um tipo pouco comum no sistema brasileiro. E ainda: significa potências unitárias elevadas para esse tipo de turbina.

De fato, turbinas bulbo parecem ser as mais adequadas para vários aproveitamentos na Amazônia brasileira, onde há baixa queda e grande fluxo de água. Por serem tipicamente turbinas de fluxo, com gerador incorporado, permitiriam minimizar a área alagada. Turbinas deste tipo são largamente encontradas em aproveitamentos hidrelétricos de baixa queda em vários países. Ocorre que a vazão nos rios amazônicos por vezes é tão grande que, mesmo em sítios de baixa queda, a potência unitária tende a ser muito elevada. É o caso, por exemplo, das usinas de Santo Antonio e Jirau, em estudo no rio Madeira, em Rondônia.

Note-se que, em ambos os casos, a potência unitária é superior a 70 MW, o que indica um desafio tecnológico. Ainda no campo da geração, há a questão da recapitação e modernização de usinas existentes, idéia que ganha força na medida do avanço cronológico dos equipamentos em operação. É inegável que a recapitação e a modernização do parque existente é uma ação necessária. Deve-se ter em vista, contudo, que seu principal benefício, não negligenciável, por suposto, é a recuperação e a manutenção da produção da instalação.

Aspectos tecnológicos também são relevantes na questão da transmissão quando se tem em vista o aproveitamento do potencial hidrelétrico da Amazônia. Com efeito, a floresta e as grandes distâncias envolvidas entre os sítios de geração e os mercados consumidores de maior magnitude descortinam o uso de tecnologias que permitam maximizar o volume de energia transportado, travessias de rios ou sítios que poderão exigir grandes vãos de linha e torres de grande altura, para minimizar impactos sobre o meio físico.

Também são adequadas à baixa queda as turbinas do tipo “bulbo”, que já podem atingir, hoje, mais de 50 MW de potência unitária (GE, 2006). Ainda conforme a GE, são turbinas usadas em locais com quedas de 5 a 20m. Outro fabricante, a Hitachi Ltd. (2006) indica que podem ser usadas em quedas de até 40m e podem atingir potência de até 100 MW.

Turbinas bulbo parecem ser as mais adequadas para vários aproveitamentos na Amazônia brasileira, onde há baixa queda e grande fluxo de água. Por serem tipicamente turbinas de fluxo, com gerador incorporado, permitiriam minimizar a área alagada. Turbinas deste tipo são largamente encontradas em aproveitamentos hidrelétricos de baixa queda da

Austrian Hydro Power. A Figura 3.2, reproduzida de documento da Austrian Hydro Power (2006), apresenta a seção de um aproveitamento que opera com turbinas bulbo.

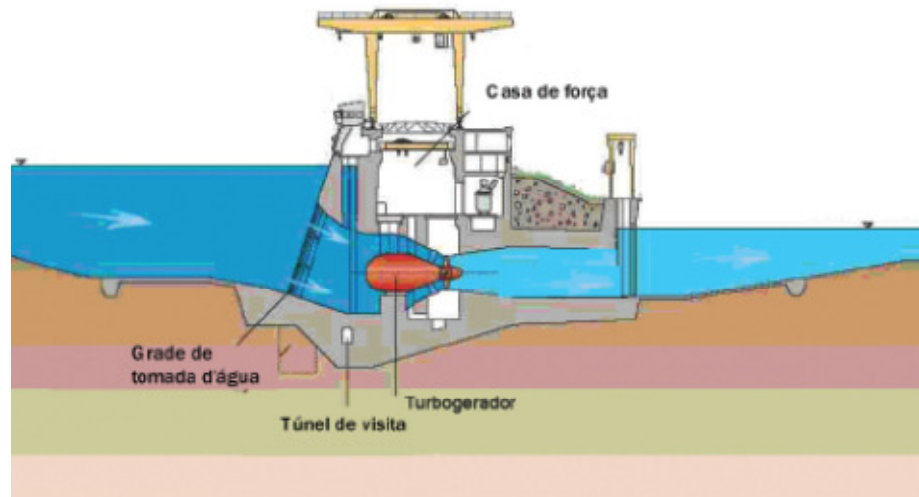


Figura 3.2 - Seção de um aproveitamento que opera com turbinas bulbo.

Fonte: Austrian Hydro Power (2006).

Ocorre que a vazão nos rios amazônicos por vezes é tão grande que, mesmo em sítios de baixa queda, a potência unitária tende a ser muito elevada. É o caso, por exemplo, das usinas de Santo Antonio e Jirau, em estudo no rio Madeira, em Rondônia, cujas características gerais são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Usinas hidrelétricas de Santo Antonio e Jirau, rio Madeira

Item	Santo Antonio	Jirau
Queda líquida, m	13,9	15,9
Potência unitária, MW	71,6	75,0
Número de unidades	44	44
Potência total, MW	3.150,4	3.300,0

Fonte: EPE, 2006a.

Note-se que, em ambos os casos, a potência unitária é superior a 70 MW, o que indica um desafio tecnológico a ser enfrentado. De fato, as referências mundiais disponíveis (ver Tabela 3.3) apontam uma potência máxima unitária de 65,8 MW, na usina de Tadami, no Japão, cujo modelo é apresentado na Figura 3.3.



Tabela 3.3 – Turbinas bulbo: projetos de referência

Usina	Localização	Queda líquida	Potência unitária
Tadami	Japão	20,7m	65,8 MW
Lingjintan	China	13,2m	34,0 MW
Hongjiang	China	27,3m	45,6 MW

Fonte: HITACHI, 2006.

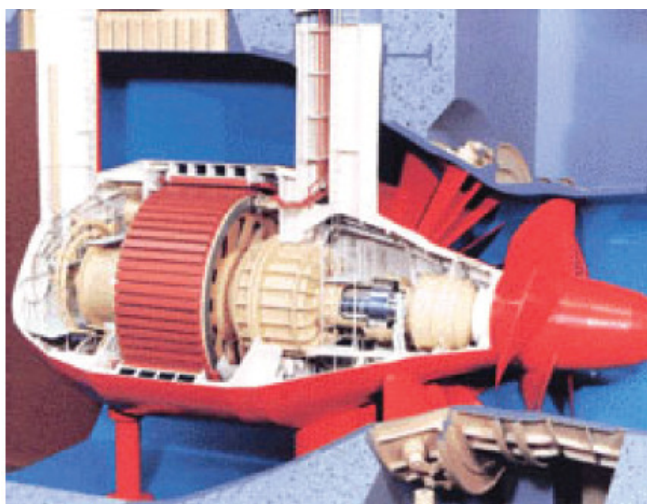


Figura 3.3 – Modelo da turbina bulbo da usina de Tadami, Japão (HITACHI, 2006).

#### d) Turbinas Pelton.

Há, ainda, as turbinas Pelton, de ação, indicadas para altas quedas e as turbinas reversíveis, que são usadas também como bombas.

### 3.3 – Modelagem das turbinas hídricas.

Segundo Saidel (1995), as curvas de colina (diagramas de colina ou curvas de isorendimento) são usualmente obtidas para a operação tradicional em rotação fixa. Elas podem ser obtidas a partir do ensaio do modelo da turbina construída em escala, mantendo-se semelhança geométrica, ou a partir do ensaio do protótipo. A primeira alternativa aplica-se normalmente a turbinas de maior porte dadas as dificuldades para realização de ensaios e a necessidade de avaliação precisa anterior à construção.

Os modelos reduzidos são normalmente ensaiados em laboratórios que permitem o controle dos diversos parâmetros envolvidos com o desempenho das turbinas, obtendo-se as

chamadas curvas unitárias, que são curvas de colina obtidas para altura de queda líquida de 1m e diâmetro de entrada do rotor também de 1m.

Cada turbina é projetada para atender certos valores prefixados de descarga ( $Q$ ), de altura de queda ( $H$ ) e de número de rotações por minuto ( $n$ ), obtendo um rendimento total ( $N$ ), máximo. Como a operação da turbina pode ser variável em função dos valores de  $Q$  e  $H$ , é importante conhecer o que acontece com as grandezas envolvidas.

Devido à dificuldade de se estabelecer uma equação matemática simples que traduza a dependência entre as variáveis envolvidas, é necessário realizar ensaios de laboratório ou de campo e estudos da similaridade geométrica e hidrodinâmica, para que seja possível estabelecer como se comporta uma turbina, quando variam essas grandezas.

As principais relações que se podem estabelecer destes ensaios são as seguintes:

- variação de  $Q$ ,  $n$  e  $N$  com a queda, para uma mesma turbina;
- variação do rendimento em função do  $n$ ,  $Q$  e  $N$ , para uma mesma turbina;
- variação de turbinas geometricamente semelhantes com a mesma queda;
- variação de turbinas geometricamente semelhantes sob quedas diferentes (modelo reduzido).

Os ensaios, tanto em laboratório, como no campo, são ferramentas de análise muito importantes, pois ajudam a verificar o comportamento das turbinas sob certas condições operativas, servem como campo de pesquisa, para aperfeiçoamentos e inovações no projeto da turbina, possibilitam a obtenção de dados para traçados de curvas características e, ainda, verificar a similaridade entre protótipo e modelo.

Os ensaios em laboratórios podem ser em instituições de pequeno ou grande porte, de universidades ou fabricantes. São utilizados equipamentos especiais para se determinar as medições de nível, vazão, pressão, número de rotações e abertura do distribuidor, possibilitando a determinação dos valores de potência e rendimento e, conseqüentemente, o traçado do gráfico de colina, ou seja, curvas de isorendimento em função da rotação unitária e vazão unitária, ou em função da abertura do distribuidor.

O diagrama de colina, conforme mostrado na figura 3.4, apresenta as curvas de vazão (eixo  $y$ ), em função da rotação (eixo  $x$ ). São mostrados, também, os valores de rendimento -  $N$ , em função da rotação unitária, com abertura constante do distribuidor, sendo chamadas de curvas de isorendimento, além da zona proibida de operação e potências extraídas para diversas situações.

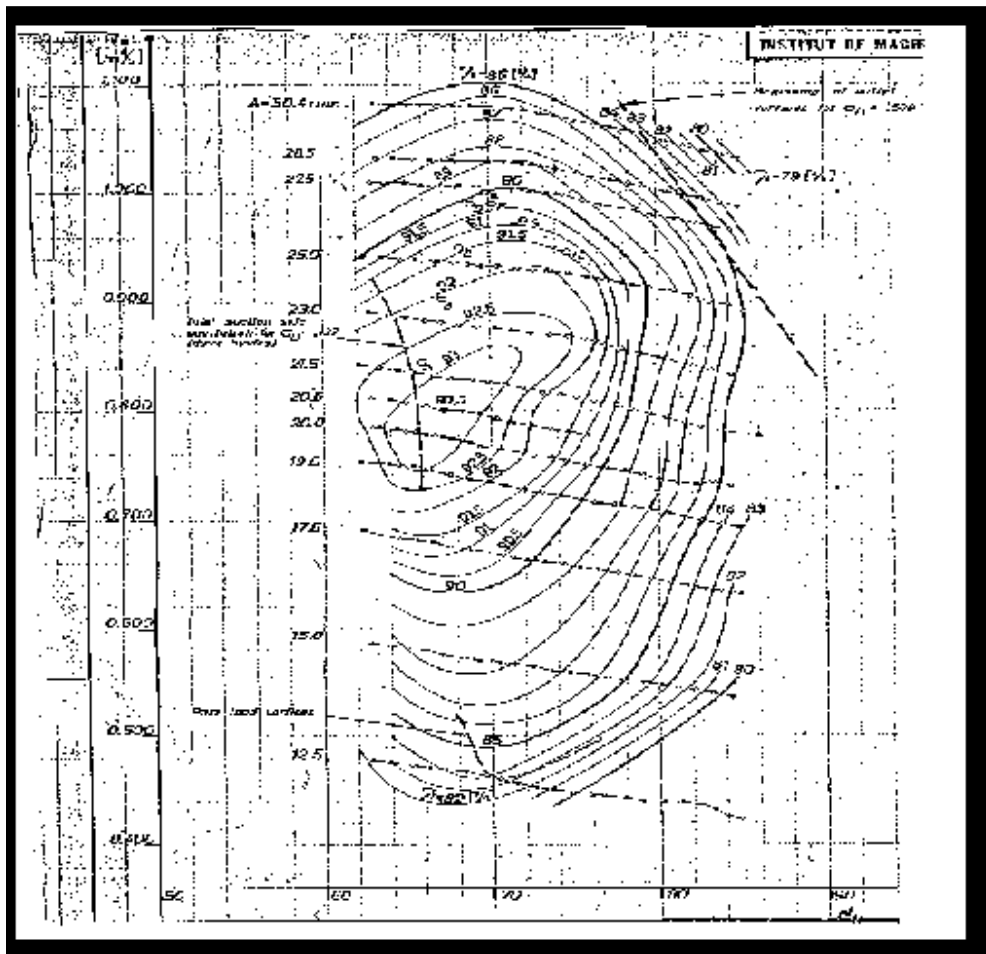


Figura 3.4 - Diagrama de Colina de ensaio em modelo reduzido da turbina Francis da ITAIPU BINACIONAL (Filho, 1998).

Este tipo de gráfico é muito importante, pois determina o campo básico de funcionamento da turbina e é muito útil, quando da transposição dos resultados para o protótipo, e a transposição do modelo para o protótipo, considerando os efeitos de escala, deve seguir os passos indicados pela IEC - International Electrotechnical Commission, publicação IEC 995. Esta norma, porém, faculta a utilização dos prescritos da norma anterior, a IEC 193, caso o ensaio em modelo reduzido da turbina em estudo, tenha sido realizado seguindo estes padrões.

Outro exemplo disto é dado na Figura 3.5.a e 3.5.b, sendo este diagrama típico para turbinas de rotação específica (ns) entre 111 e 178 [BLAIR, 1976]. Neste caso, a queda de projeto da turbina e a respectiva vazão para a turbina totalmente aberta são considerados como base para a determinação das quedas e vazões.

Os exemplos que seguirão são para uma turbina com ns de 150, queda líquida nominal de 60,4 metros e vazão, à máxima abertura, nesta queda de 10 metros cúbicos por segundo. A potência máxima, na queda nominal, é de 5,2 MW e a rotação nominal é 300 rpm. Assim

sendo, partindo-se das funções (3.1) e (3.2) seguintes, que representam os diagramas das Figuras 3a e 3b, pode-se proceder a modelagem linearizada em grandezas unitárias da turbina.

$$H = f(Q, a, n) \quad (3.1)$$

$$P = g(H, a, n) \quad (3.2)$$

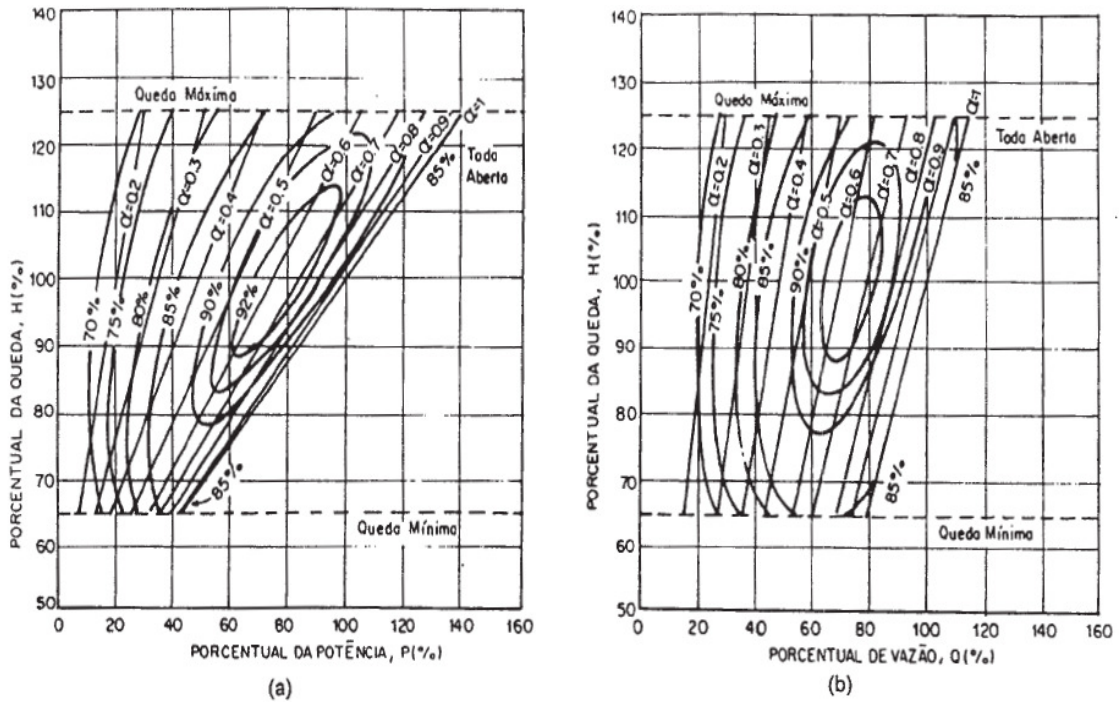


Figura 3.5 - Diagramas colinas; a)  $H \times P$ , para rotação constante, igual a 300 rpm; b)  $H \times Q$ , para rotação constante, igual a 300 rpm. (Santos & Filho, 1997)

Para a obtenção do traçado das curvas de colina no método clássico, são obtidas de forma manual utilizando-se papel milimetrado. Esta forma de representação é pouco prática, trabalhosa, demorada e um tanto intuitiva, como mostra a figura 3.6 abaixo

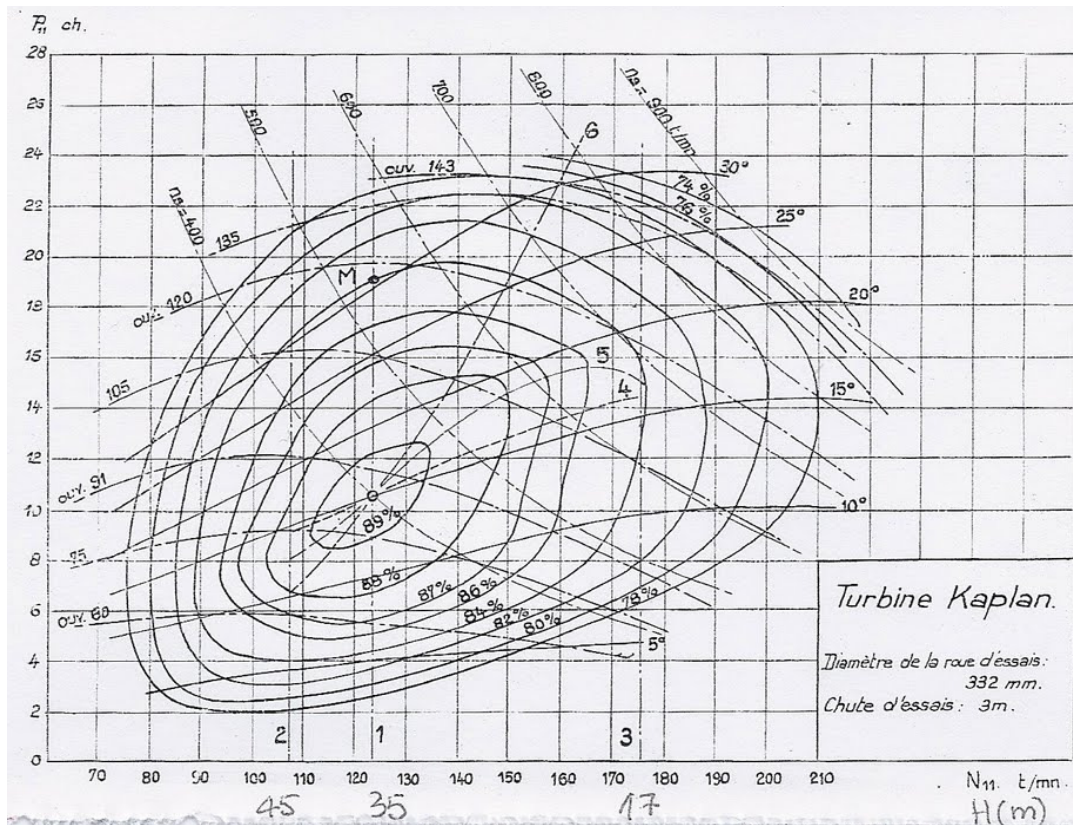


Figura 3.6 – Curvas de colina através do método tradicional em papel milimetrado (FILHO, 1998).

Para turbinas operando em rotação ajustável, para os ensaios realizados em modelos reduzidos, as curvas de colina são usualmente expressas em termos de  $Q \times n$ , que são dados pelas expressões:

$$n = n_1 \sqrt{H} / D_1 \quad (3.3)$$

$$Q = Q_1 D_1^2 \sqrt{H} \quad (3.4)$$

$$P = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (3.5)$$

Onde:

$n$  - é a velocidade da turbina em rpm;

$n_1$  - é a velocidade unitária em rpm;

$Q$  - é a vazão em  $m^3/s$ ;

$H$  - é a altura da queda em m;

$D_1$  - é o diâmetro da turbina em m.

Na figura 3.7 é apresentado um exemplo de curva de colina para uma representação realista do rendimento da turbina e do gerador. É mostrada a importância para proporcionar um despacho otimizado.

Além disso, as unidades geradoras têm zonas proibidas para a geração. Essas zonas proibidas, bem como o complexo inter-relacionamento entre as variáveis, são usualmente representadas na curva-colina, tal como é ilustrado na Figura 3.7. Nessa figura, por exemplo, observam-se os rendimentos de uma unidade, representados por meio de curvas de nível, limites da vazão turbinada, altura de queda líquida e potência de saída da unidade. É possível observar ainda que essa unidade possui apenas uma zona proibida de geração, compreendida entre 0 e 80 MW.

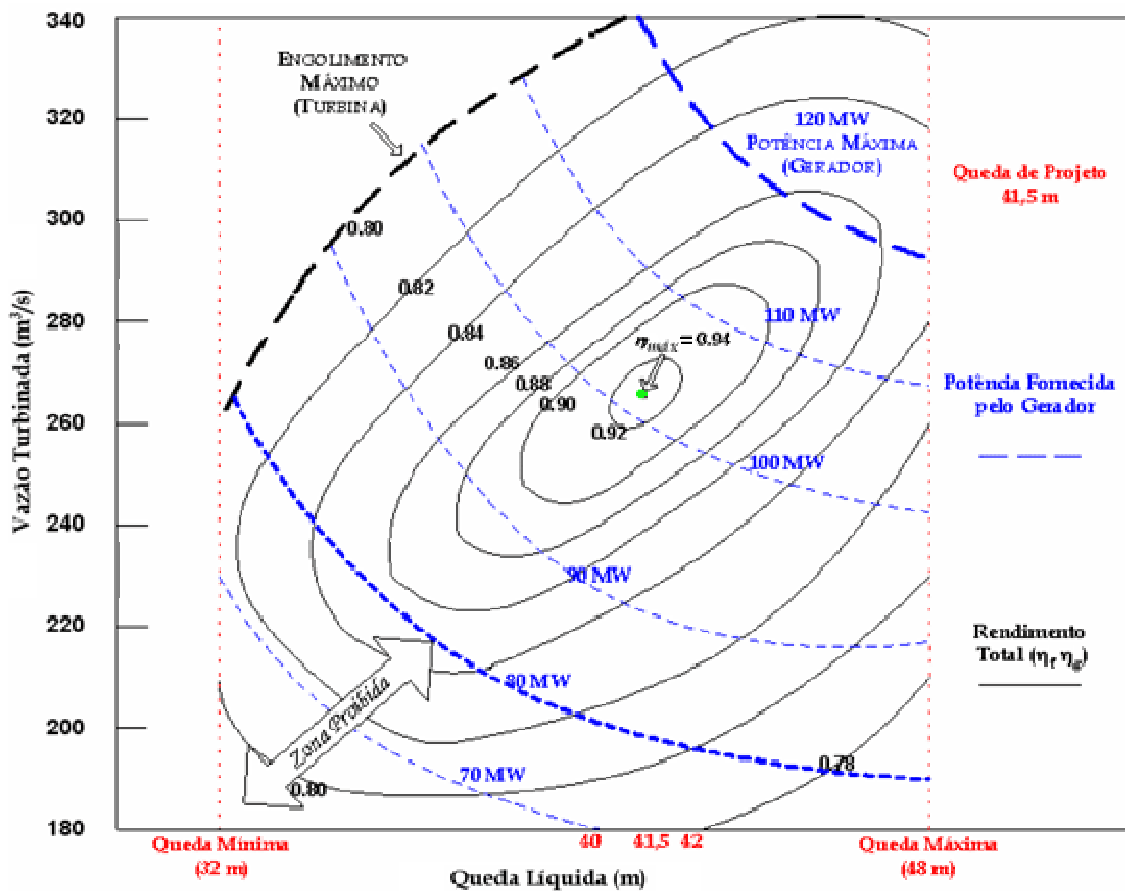


Figura 3.7 - Curva-Colina de Uma Unidade Hidrelétrica (Rodrigues et al., 2006)

### 3.4 - Velocidade ajustável aplicada aos diferentes tipos de turbinas.

O emprego da velocidade ajustável em turbinas hidráulicas não traz os mesmos benefícios para todos os tipos de turbinas. Segundo Kelber (1997), Máquinas que operam em baixas quedas, 30m a 80m, têm maiores benefícios com a operação em velocidade ajustável que máquinas projetadas para altas quedas. A 300m, as curvas de nível das curvas de colina são circulares e, por causa disto, a velocidade ajustável não traria nenhuma melhora substancial, pois, nestes casos, pequenos ajustes na velocidade não proporcionam deslocamentos suficientemente grandes do ponto de operação da turbina para atravessar diversas regiões de rendimento, não havendo, assim, aumentos significativos na eficiência da turbina.

A figura 3.8 faz uma comparação entre as curvas de colina das turbinas bulbo, propeller, Kaplan, Francis, e de impulso, mostrando que máquinas para baixas quedas, ou seja, de alta velocidade específica, são mais adaptáveis para a operação em velocidade ajustável do que turbinas para altas quedas, ou de baixa velocidade específica, devido à forma de suas curvas de colina.

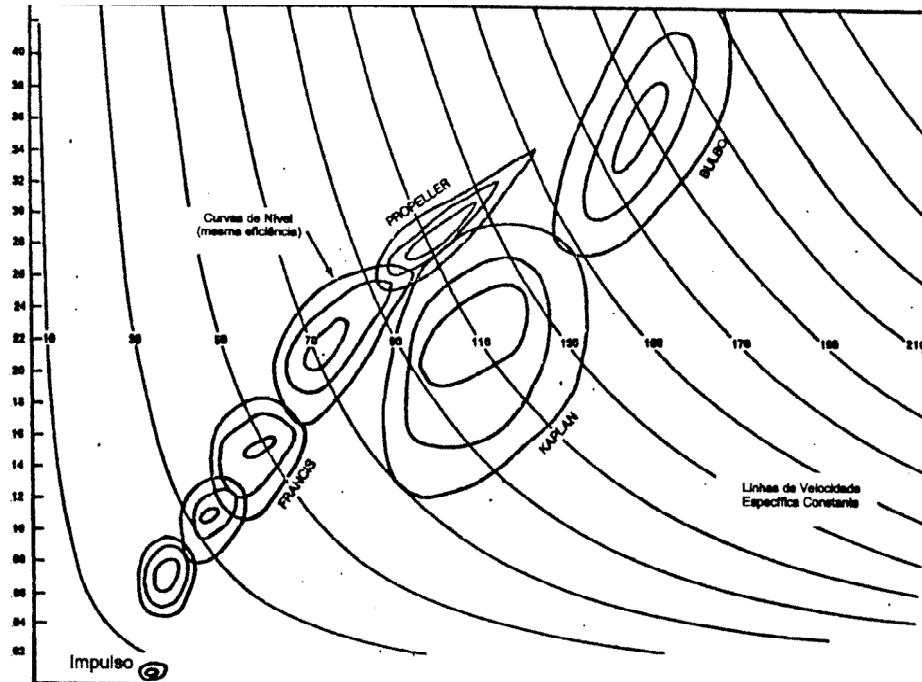


Figura 3.8 - Comparação entre as curvas de colina das turbinas Bulbo, Propeller, Kaplan, Francis, e de impulso (KELBER, 1997).

### 3.5 – Conclusões.

O capítulo mostrou os diversos tipos de turbinas hídricas, a modelagem dessas turbinas, além das turbinas mais utilizadas na geração hidráulica de energia elétrica utilizando a tecnologia de velocidade ajustável, assim como as que mais eficientes.

São mostradas as principais aplicações do sistema de velocidade ajustável em geração hidroelétrica, evidenciando as características em nos diferentes tipos de turbinas e em cada tipo de reservatório, concluído-se que a turbina Francis é a que apresentou uma melhor aplicação para busca de maior eficiência.

A modelagem das turbinas que utilizam recursos computacionais são mais precisas, além de ter uma construção facilitada, em detrimento da modelagem tradicional de forma manual que é de certa forma intuitiva, imprecisa e trabalhosa. No próximo capítulo, será mostrado de forma mais detalhada, como é realizada a modelagem da turbina hídrica utilizando-se uma ferramenta computacional atualmente utilizada que são as redes neurais artificiais.



## **4 – REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS.**

### **4.1 – Introdução.**

O desenvolvimento tecnológico impõe novas necessidades para solucionar problemas e situações cada vez mais complexas, e para isso medidas mais confiáveis e velozes são necessárias para um resultado mais preciso e rápido. A utilização das técnicas de inteligência artificial (IA) tornou-se necessária, devido à ausência de uma formulação analítica eficaz, capaz de solucionar o problema de forma ótima.

Tais técnicas surgem como soluções promissoras, onde a natureza heurística e simbólica do raciocínio envolvido nas tarefas do operador pode ser modelada. Os resultados obtidos com aplicações de sistemas inteligentes em sistemas de potência mostram que a utilização destas técnicas é adequada e bastante proveitosa, capaz de solucionar problemas nos quais as técnicas convencionais de programação não apresentam bons resultados, segundo Vale & Ramos (1995).

Waikar & Rahman (1998) mostram que a tecnologia digital está cada vez mais presente nos diversos segmentos que compõem o sistema elétrico de potência e favorece o desenvolvimento de pesquisa e aplicação de técnicas de inteligência artificial.

A idéia de criar uma máquina “inteligente” por meio de dispositivos que funcionassem como neurônios artificiais, segundo Loesch (1996), obteve seus primeiros resultados nas experiências realizadas entre 1943 e 1962. Todavia, pesquisas nesta área somente foram possíveis na década de 1980, em razão do aparecimento de computadores mais velozes e da descoberta de novas estruturas de redes, com algoritmos de aprendizagem mais eficientes.

A capacidade de pensar, memorizar e resolver problemas tem levado muitos cientistas a tentar modelar a sua operação. Diversos pesquisadores têm buscado criar um modelo computacional que represente a funcionalidade do cérebro, de uma maneira simples.

As redes neurais artificiais consistem em um modo de se abordar a solução de problemas que envolvam inteligência artificial, onde se procura construir um computador que tenha circuitos (ou algoritmos) com inspirações nos processos e estruturas cerebrais e espera-se ver um comportamento inteligente emergindo, aprendendo novas tarefas, errando, fazendo generalizações e descobertas, e freqüentemente ultrapassando o seu professor, conforme Barreto (1997).

Pode-se dizer que as redes neurais constituem uma forma de aproximação universal de funções, que apresenta um desempenho satisfatório durante a interpretação e classificação de

padrões complexos. Estas são também bastante versáteis e podem aprender continuamente, além de apresentarem capacidade de generalização e alto desempenho computacional, devido ao seu forte paralelismo (SKAPURA, 1996; FAUSETT, 1994).

As redes neurais diferem bastante das técnicas de IA que dependem do conhecimento prévio das regras que governam o fenômeno, pois são adaptáveis e inferem soluções a partir dos exemplos utilizados durante o treinamento. O fato de estas serem não lineares permite que elas captem interações complexas entre as variáveis, como ocorre normalmente no mundo real (LEFÉVRE, 1996).

Enquanto a eficiência computacional e a precisão constituem os principais índices para avaliar o desempenho de métodos analíticos convencionais, para as redes neurais são esperadas outras aptidões, ou seja, auto-organização, adaptabilidade, extração de características, entre outras (MORI, 1996).

Segundo Haykin (2001), as redes neurais artificiais consistem em um método para solucionar problemas de inteligência artificial, construindo um sistema que tenha circuitos que simulem o cérebro humano, inclusive seu comportamento, ou seja, aprendendo, errando e fazendo descobertas. São mais que isso, são técnicas computacionais que apresentam um modelo inspirado na estrutura neural de organismos inteligentes e que adquirem conhecimento através da experiência. Uma grande rede neural artificial pode ter centenas ou milhares de unidades de processamento, enquanto que o cérebro de um mamífero pode ter muitos bilhões de neurônios.

#### **4.2 – Rede neural artificial genérica.**

Uma rede neural é formada por um conjunto de unidades de processamento simples que se comunicam enviando sinais uma para a outra através de conexões ponderadas. O componente elementar desse modelo são as unidades de processamento, também chamadas nós, neurônios ou células. Essa unidade de processamento é um modelo matemático, que possui uma inspiração no modelo biológico de um neurônio. Objetivando simular o comportamento deste neurônio biológico, McCulloch e Pitts (1943), propuseram o modelo da figura. Neste modelo, cada sinal positivo ou negativo que entra pelo sistema, é multiplicado por um número, ou peso, que indica a sua influência a saída. Caso a soma ponderada dos sinais exceda certo limite, é gerada uma resposta na saída.

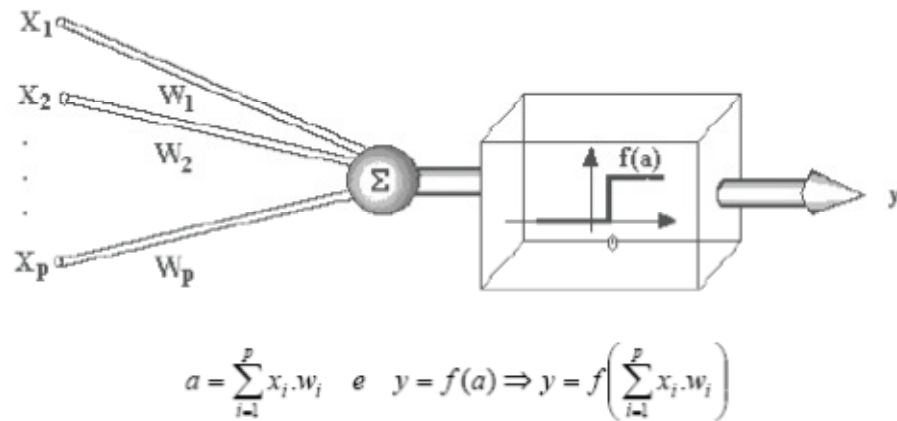


Figura 4.1 – Modelo e função matemática de um neurônio (HAYKIN, 2001).

No modelo geral de neurônio da Figura 4.1 as entradas  $w_i x_i$  são combinadas usando uma função  $f$ , para produzir um estado de ativação do neurônio (correspondente à frequência de descarga do neurônio biológico). As entradas chegam através dos dendritos e tem um peso atribuído pela sinapse. A função básica de um neurônio é somar as entradas e retornar uma saída, caso esse valor seja maior que o valor de soma “*threshold*”, segundo Haykin (2001).

A rede neural é, geralmente, constituída de uma camada de entrada, que recebe os estímulos, e de uma camada de saída, que produz a resposta. Algumas redes podem ter uma ou mais camadas internas (também chamadas ocultas ou escondidas). A capacidade computacional de uma rede neural está nas conexões entre os elementos processadores. Nos pesos que ponderam cada conexão são armazenadas as informações que a rede “aprendeu”. Em uma RNA os neurônios podem estar agrupados por camadas direcionadas ou não, com ligações em um sentido (para frente) ou em ambos (para frente e para trás). As redes com ligações somente para frente, também chamadas de diretas ou *feed-forward*, se dividem em redes monocamada e multicamadas. De forma geral, operação de uma célula da rede se resume, conforme Haykin (2001):

- i) Sinais são apresentados à entrada;
- ii) Cada sinal é multiplicado por um peso que indica sua influência na saída da unidade;
- iii) É feita a soma ponderada dos sinais que produz um nível de atividade;
- iv) Se este nível excede um limite (“*threshold*”), a unidade produz uma saída.

Três conceitos são importantes na compreensão do processo de aprendizagem:

- i) Treinamento ou Aprendizado: conjunto de procedimentos utilizados para ajustar os parâmetros das redes neurais, de maneira que possam realizar determinada função;

- ii) Número de ciclos: número de vezes que os padrões de treinamento serão apresentados às redes neurais, a fim de que se faça a atualização dos pesos;
- iii) Taxa de Aprendizagem: controla a intensidade das alterações dos pesos - uma alta taxa de aprendizado acelera o processo, mas pode reduzir a capacidade de generalização da rede neural.

### 4.3 - A Representação de Conhecimentos.

A representação de conhecimentos nas redes conexionistas, como diz o próprio nome, é fortemente ligada à noção de conexão entre neurônios (elementos processadores de informação) que interagem uns com os outros através destas ligações. O modelo conexionista possui sua origem nos estudos feitos sobre as estruturas de nosso cérebro – sofrendo uma grande simplificação do modelo original – onde encontramos no modelo artificial, que é simulado, elementos como os neurônios e as suas conexões, chamadas de sinapses.

A figura 4.2 abaixo mostra um modelo de neurônio artificial definido pelas entradas, pesos, somador, a função de ativação gerando uma saída. Os conhecimentos das redes se resumem um conjunto de valores numéricos descrevendo as conexões, e por conseqüência, estes valores descrevem também o comportamento da rede.

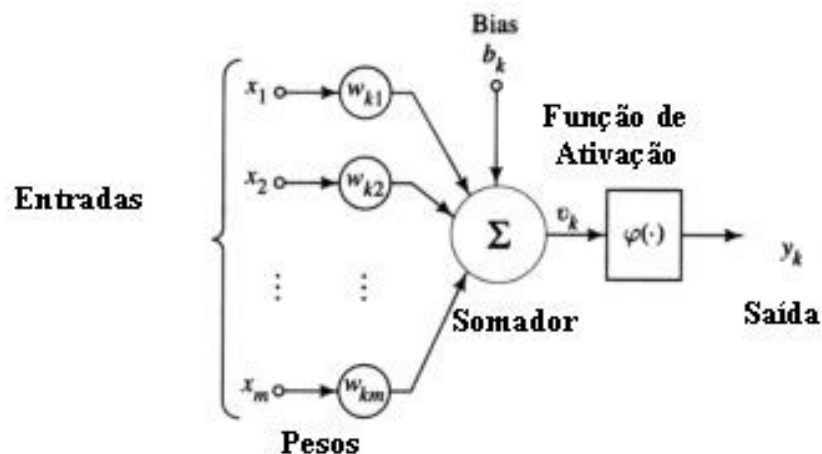


Figura 4.2 – Modelo de neurônio artificial (HAYKIN, 2001).

Estas redes são formadas por um conjunto de unidades elementares de processamento de informações fortemente conectadas, que denominamos de neurônios artificiais. Uma RNA é constituída por um grafo orientado e ponderado. Os nós deste grafo são autômatos simples,

os chamados neurônios artificiais, que formam através de suas conexões um autômato mais complexo, a rede neural, também conhecida como rede conexionista.

Cada unidade da rede é dotada de um estado interno, denominado de estado de ativação. As unidades podem propagar seu estado de ativação para as outras unidades do grafo, passando pelos arcos ponderados, que serão chamados de conexões, ligações sinápticas ou simplesmente de pesos sinápticos. A regra que determina a ativação de um neurônio em função da influência vinda de suas entradas, ponderadas pelos seus respectivos pesos, se chama regra de ativação ou função de ativação.

As mudanças realizadas nos valores dos pesos sinápticos ou na estrutura de interconexão das unidades de uma rede são responsáveis pelas alterações no comportamento de ativação desta rede. Estas alterações nas conexões e na estrutura da rede é o que permite realizar o aprendizado de um novo comportamento. Desta maneira pode-se modificar o estado de ativação na saída da rede em resposta a certa configuração de entradas. Portanto, a rede é capaz de estabelecer associações de entrada e saída (estímulo e resposta) a fim de se adaptar a uma situação proposta.

#### 4.3.1 – Funções de Ativação.

A partir do modelo proposto por McCulloch e Pitts (1943) foram derivados vários outros modelos que permitem a produção de uma saída qualquer, não necessariamente zero ou um, e com diferentes funções de ativação. A Figura 4.6 ilustra, graficamente, quatro funções de ativação diferentes: a função linear, a função rampa, a função degrau (*step*) e a função sigmoidal.

A função de ativação linear, mostrada na Figura 4.6a, é definida pela equação abaixo:

$$y = \alpha x$$

Onde:  $\alpha$  é um número real que define a saída linear para os valores de entrada,  $y$  é a saída e  $x$  é a entrada.

A função linear pode ser restringida para produzir valores constantes em uma faixa, e neste caso, passa a ser a função rampa mostrada, graficamente, na Figura 4.6b.

A função *step*, ilustrada na Figura 4.6c, é similar a uma função rampa, pois a função produz a saída  $+\gamma$  para valores de  $x$  maiores que zero, caso contrário a função produz o valor de  $-\gamma$ .

A função sigmoial, conhecida também como *S-shape*, ilustrada na Figura 4.6d, é uma função semi-linear. É possível definir várias funções sigmoiais. Uma das funções sigmoiais mais importantes é a função logística definida por.

$$y = \frac{1}{1 + e^{-x/T}}$$

Onde o parâmetro T determina a suavidade de curva.

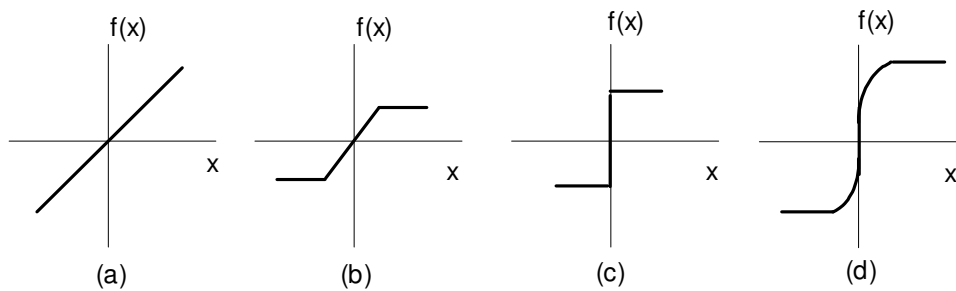


Figura 4.6 - Algumas funções de ativação; (a) linear; (b) rampa; (c) *step* (d) sigmoial.

#### 4.3.2 – Aprendizado.

As RNAs possuem a capacidade de aprender através exemplos e fazer interpolações e extrapolações do que aprenderam. No aprendizado conexionista não se procura obter regras como na abordagem simbólica da Inteligência Artificial (IA), mas determinar a intensidade das conexões entre os neurônios. Um conjunto de procedimentos bem definidos para adaptar os parâmetros de uma RNA, afim de que a mesma possa aprender uma determinada função é chamado de algoritmo de aprendizado.

Como era de se esperar, não há um único algoritmo de aprendizado. O que temos é um conjunto de ferramentas representadas por diversos algoritmos, cada qual com suas vantagens e desvantagens. Estes algoritmos, basicamente, diferem pela maneira através da qual o ajuste dos pesos é feito.

A utilização de uma RNA na solução de uma tarefa passa, inicialmente, por uma fase de aprendizagem, onde a rede extrai características relevantes de padrões de informações apresentados para a mesma, criando assim uma representação própria para o problema. A etapa de aprendizagem consiste em um processo iterativo de ajuste de parâmetros da rede, os pesos das conexões entre as unidades de processamento, que guardam o conhecimento que a rede adquiriu do ambiente em que está operando.

Uma definição geral do que vem a ser aprendizagem pode ser expressa da seguinte forma, segundo Mendel e McLaren (1970) que diz:

“Aprendizagem é o processo pelo qual os parâmetros de uma rede neural são ajustados através de uma forma continuada de estímulos fornecidos pelo ambiente no qual a rede está operando, sendo que o tipo específico de aprendizagem realizado, é definido pela maneira particular como ocorrem os ajustes realizados nos parâmetros”.

Diversos métodos para treinamento de redes foram desenvolvidos, podendo estes serem agrupados em dois paradigmas principais: Aprendizado Supervisionado e Aprendizado Não Supervisionado. Outros dois paradigmas bastante conhecidos são os de Aprendizado por Reforço (que é um caso particular de Aprendizado Supervisionado) e Aprendizado por Competição (que é um caso particular de Aprendizado Não Supervisionado).

#### a) Aprendizado Supervisionado.

Este método de aprendizado é o mais comum no treinamento das RNAs, tanto de neurônios com pesos, quanto de neurônios sem pesos, sendo chamado *Aprendizado Supervisionado* porque a saída desejada que a rede deve resultar é fornecida por um supervisor (professor) externo. O objetivo é ajustar os parâmetros da rede, de forma a encontrar uma ligação entre os pares de entrada e saída fornecidos.

O professor indica, explicitamente, um comportamento bom ou ruim para a rede, visando direcionar o processo de treinamento. A rede tem calculada sua saída corrente comparada com a saída desejada, recebendo informações do supervisor sobre o erro da resposta atual. A cada padrão de entrada submetido à rede compara-se a resposta desejada (que representa uma ação ótima a ser realizada pela rede) com a resposta calculada, e os pesos das conexões são ajustados para minimizar o erro. A minimização da diferença é incremental, já que pequenos ajustes são feitos nos pesos a cada etapa de treinamento, de tal forma que estes caminhem, se possível, para uma solução. A Figura 7.4 ilustra o mecanismo de Aprendizado Supervisionado.

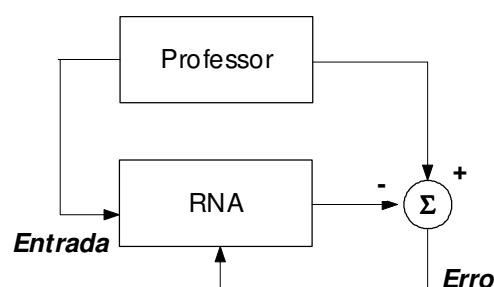


Figura 7.4 - Aprendizado Supervisionado.

A desvantagem do Aprendizado Supervisionado é que, na ausência do professor, a rede não conseguirá aprender novas estratégias para situações não cobertas pelos exemplos do treinamento da rede. Os exemplos mais conhecidos de algoritmos de Aprendizado Supervisionado são a regra delta ou correção de erros, como será visto na seção seguinte, conforme Widrow e Hoff (1960) e a sua generalização para redes de múltiplas camadas, o algoritmo *back-propagation* [RUMELHART, 1986].

#### b) Correção de Erros.

O método de aprendizado por correção de erros também pode ser chamado de regra delta de aprendizado e procura minimizar a diferença entre a soma ponderada das entradas pelo pesos (saída calculada pela rede) e a saída desejada, ou seja, o erro da resposta atual da rede.

Este processo aparece tanto no algoritmo de treinamento do perceptron [ROSENBLATT, 1958] quanto no algoritmo para treinamento do ADALINE [WIDROW e HOFF, 1960] e posterior generalização para o algoritmo *back-propagation* [RUMELHART, 1986].

#### c) Aprendizado Não Supervisionado.

No Aprendizado Não Supervisionado, como o próprio nome sugere, não há um professor ou supervisor para acompanhar o processo de aprendizado. Este método é ilustrado na Figura 4.8. Para este tipo de aprendizado, somente os padrões de entrada estão disponíveis para rede, ao contrário do Aprendizado Supervisionado, cujo conjunto de treinamento possui pares de entrada e saída. A partir do momento em que a rede estabelece uma harmonia com as regularidades estatísticas da entrada de dados, desenvolve-se nela uma habilidade de formar representações internas para codificar características da entrada e criar novas classes ou grupos automaticamente. Este tipo de aprendizado, só se torna possível, quando existe redundância nos dados de entrada. Sem redundância seria impossível encontrar quaisquer padrões ou características dos dados de entrada.

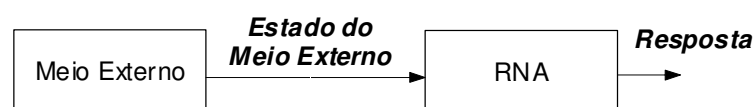


Figura 4.8 - Aprendizado Não Supervisionado.



Uma das vantagens do Aprendizado Não Supervisionado pode ser visualizada na ausência do supervisor ou professor (responsável pela indicação da saída desejada). A desvantagem está, intimamente, ligada ao conjunto de dados para treinamento, onde este deve ser redundante para que a rede consiga abstrair características em seu treinamento.

#### d) Aprendizado Hebbiano.

Os resultados obtidos por Hebb (1949) motivaram os primeiros métodos de aprendizado em RNAs. Como originalmente postulado, a regra de Hebb propõe que o peso de uma conexão sináptica deva ser ajustado, caso exista sincronismo entre os “níveis de atividade” das entradas e saídas. Caso dois neurônios, em lados distintos da sinapse, são ativados sincronamente, teremos um fortalecimento desta sinapse. Entretanto, se os neurônios forem ativados assincronamente, a sinapse será enfraquecida ou mesmo eliminada. Em outras palavras, se o neurônio pré-sináptico tiver grande influência na ativação do neurônio pós-sináptico, a conexão entre eles deve ser reforçada.

Apesar dos vetores de entrada e saída serem fornecidos (como no Aprendizado Supervisionado), a regra de Hebb é classificada como Aprendizado Não Supervisionado, já que não existe supervisor externo para verificar a qualidade da resposta da rede para prover ajustes de pesos. Neste caso, o treinamento da rede é feito, independentemente, da resposta atual, através de um mecanismo local à sinapse.

#### e) Aprendizado por Competição.

Aprendizado por Competição é um caso particular de Aprendizado Não Supervisionado [FUKUSHIMA, 1975; KOHONEN, 1982, GROSSBERG, 1976]. A ideia neste caso é, dado um padrão de entrada, fazer com que as unidades de saída disputem entre si para serem ativadas. Existe, portanto, uma competição entre as unidades de saída para decidir qual delas será a vencedora e, conseqüentemente, terá a sua saída ativada e seus pesos atualizados no treinamento.

As unidades de entrada são diretamente conectadas às unidades de saída, sendo que estas últimas também podem estar ligadas entre si via conexões laterais inibitórias, ou negativas. A unidade de saída com maior ativação inicial terá mais chance de vencer a disputa com as outras unidades, que perderão o poder de inibição ao longo do tempo sobre as unidades de maior ativação. A unidade mais forte fica ainda mais forte e seu efeito inibidor

sobre as outras unidades de saída torna-se dominante. Com o tempo, todas as outras unidades de saída ficarão completamente inativas, exceto a vencedora. Este tipo de inibição mútua também é conhecido como *winner tasks all*.

f) Aprendizado por Reforço.

Aprendizado por Reforço pode ser visto como um caso particular de Aprendizado Supervisionado. A principal diferença entre o Aprendizado Supervisionado clássico e o Aprendizado por Reforço é a medida de desempenho usada em cada um dos sistemas. No Aprendizado Supervisionado, a medida de desempenho é baseada no conjunto de respostas desejadas usando um critério de erro conhecido, enquanto que, no Aprendizado por Reforço o desempenho é baseado em qualquer medida que possa ser fornecida ao sistema. No Aprendizado por Reforço, a única informação de realimentação fornecida à rede é se uma determinada saída está correta ou não, isto é, não é fornecida a rede a resposta correta para o padrão de entrada. O Aprendizado por Reforço é ilustrado na Figura 4.9.

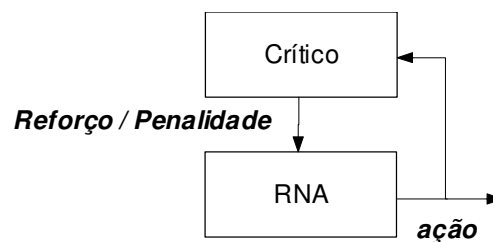


Figura 4.9 - Aprendizado por Reforço.

Aprendizado por Reforço é uma forma de aprendizado *on-line* obtido por um mapeamento de entrada-saída, através de um processo de triagem de erro desenvolvido para maximizar o índice de desempenho escalar chamada de sinal de reforço. O termo Aprendizagem por Reforço foi, inicialmente, citado por Minsky (1961) em seus estudos iniciais de IA. A idéia básica que está por trás do termo “reforço” tem sua origem em estudos experimentais sobre aprendizado dos animais [HAMPSON, 1990].

Neste contexto, é interessante lembrar a Lei do Efeito [THORNDIKE, 1911] que diz quanto maior a satisfação obtida com uma certa experiência em um animal, maiores as chances dele aprender. Sutton (1991) conceitualiza o Aprendizado por Reforço como: “Se uma ação tomada pelo sistema de aprendizagem é seguida de estados satisfatórios, então a tendência do sistema de produzir esta ação particular é reforçada. Se não for seguida de estados satisfatórios, a tendência do sistema de produzir esta ação é enfraquecida”.

#### 4.4 – Arquiteturas mais usuais de RNAs.

Dentre as arquiteturas de redes neurais mais usuais destacam-se o modelo perceptron de única e múltiplas camadas. O perceptron foi proposto por Rosenblatt (1958) e originou-se do trabalho de McCulloch e Pitts (1943) e será abordado a seguir.

##### 4.4.1 – Perceptron de Camada Única e seu Algoritmo de Aprendizado.

O trabalho original que enfocou a modelagem de um neurônio e sua capacidade computacional de solucionar problemas teve início com as pesquisas de McCulloch e Pitts (1943). Naquela época surgiram os primeiros computadores digitais e entende-se que a associação de um modelo artificial de um neurônio com a capacidade de resolver funções Booleanas está, provavelmente, ligada ao pensamento vigente na época de que era possível construir uma máquina inteligente através de operadores lógicos básicos.

Foi somente com o trabalho de Rosenblatt (1958) que o conceito aprendido em RNAs foi introduzido. O modelo proposto por Rosenblatt, conhecido como perceptron, era composto por uma estrutura de rede tendo como unidades básicas nodos MCP e uma regra de aprendizado. Alguns anos mais tarde, Rosenblatt demonstrou o teorema de convergência do perceptron, o qual mostra que um nodo MCP treinado com o algoritmo de aprendizado do perceptron sempre converge, caso o problema em questão seja linearmente separável [SYCARA, 1988].

A topologia original descrita por Rosenblatt era composta por unidades de entrada (retina), por um nível intermediário formado pelas unidades de associação e por um nível de saída formado pelas unidades de resposta. Embora, esta topologia original possua três níveis, ela é conhecida como perceptron de uma única camada, já que somente o nível de saída (unidade de resposta) possui propriedades adaptativas. A Figura 4.10 mostra um esboço da topologia do perceptron.

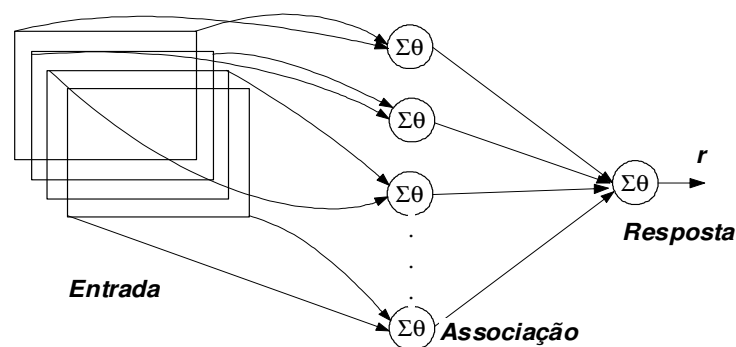


Figura 4.10 - Topologia de um perceptron simples com uma única saída.

Apesar de ter causado grande euforia na comunidade científica da época, o perceptron não teve vida muito longa, já que duras críticas de Minsky e Papert (1969) foram feitas em relação à sua capacidade computacional, causando, assim, um grande impacto sobre as pesquisas em RNAs, o que levou a um grande desinteresse pela área durante os anos 70 e início dos anos 80.

Esta visão pessimista sobre a capacidade do perceptron e das RNAs de um maneira geral mudou, devido as descrições da rede de Hopfield (1982) e do algoritmo de *back-propagation* (que será visto nas próximas seções). Foi em consequência destes trabalhos que a área de RNAs ganhou novo impulso, ocorrendo a partir do final dos anos 80, uma forma de expansão no número de trabalhos de aplicação e teóricos envolvendo RNAs e técnicas correlatadas.

#### **4.4.2 - Perceptron Multicamadas (ou MLP).**

Conforme citado na seção anterior, as redes de uma só camada resolvem apenas problemas linearmente separáveis. A solução de problemas não linearmente separáveis passa pelo uso de redes com uma ou mais camadas intermediárias, ou escondidas. Segundo Cybenko (1989), uma rede com camada intermediária pode implementar qualquer função contínua. A utilização de duas camadas intermediárias permite a aproximação de qualquer função [CYBENKO, 1988].

Com a utilização desta arquitetura é necessário, então, encontrar uma forma de treinar tal rede. Uma possibilidade seria a divisão da rede em um conjunto de sub-rede para cada camada, com treinamento independente. Uma rede com uma camada intermediária pode ser formada por um conjunto de redes perceptron, uma rede para cada grupo de entradas linearmente separáveis. Na camada de saída, uma outra rede combina as saídas produzidas pelas redes da primeira camada, gerando, assim, a classificação final. Esta solução esbarra na dificuldade de dividir um problema em subproblemas. Geralmente, esta divisão ou não é possível ou muito complicada.

Outra alternativa seria treinar a rede completa de uma só vez. O problema agora está em como treinar os nodos da camada intermediária desta rede. Quais seriam as respostas desejadas para estes nodos? Ou melhor, como seria definido o erro destes nodos? O problema passa agora ser a definição do erro dos nodos das camadas intermediárias. Se uma função de ativação do tipo limiar (função *threshold*) for utilizada, a avaliação do erro será bastante complexa, uma vez, que os nodos das camadas intermediárias e de saída não saberão quão

distantes as respostas de seus nodos estarão dos valores desejados, este é um dos problemas da rede perceptron. Uma alternativa seria a utilização de funções de ativação lineares. No entanto, uma rede com mais de uma camada cujos nodos utilizarão funções de ativação lineares é equivalente a uma rede de uma só camada.

#### 4.4.2.1 – Arquitetura MLP.

As RNAs do tipo perceptron multicamadas, ou MLP (do inglês MultiLayer Perceptron), que são RNAs que apresentam pelo menos uma camada intermediária ou escondida [RUMELHART, 1986].

Conforme visto nas seções anteriores, a inexistência ou desconhecimento de algoritmos para treinar redes com uma ou mais camadas intermediárias foi uma das causas para redução das pesquisas em RNAs na década de 70. Tal problema foi primeiro apontado por Minsky e Papert (1969), no livro “*Perceptrons*” e, por representar uma redução no universo de aplicações de RNAs, causou uma diminuição drástica tanto do número de pesquisadores que trabalhavam na área quanto no financiamento de projetos envolvendo RNAs.

As redes MLP apresentam um poder computacional maior do que aquele apresentado pelas redes sem camadas intermediárias. As redes MLPs podem tratar com dados que não são linearmente separáveis. O modelo do perceptron multi-camadas utiliza uma topologia de três ou mais camadas, sendo que as conexões entre as unidades são do tipo inter-camadas e são direcionadas da camada de entrada para a camada de saída, conforme mostrado na figura 4.8.

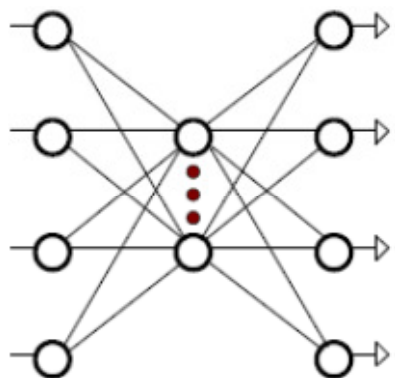


Figura 4.8 -Topologia genérica do perceptron multi-camadas (ALENCAR,1999).

A precisão obtida e a implementação de uma rede MLP dependem do número de nós utilizados nas camadas intermediárias, e um dos problemas é a definição de uma função de ativação.

No modelo dos perceptrons multi-camadas, entre uma camada e outra, existe uma matriz de pesos. A regra de propagação é a combinação entre as saídas de cada unidade e a matriz de pesos. Ela é realizada através da soma ponderada de cada sinal que chega, via conexões, pelo respectivo peso. O estado de ativação assume valores contínuos e devido a isto a regra de ativação das unidades utiliza como função de ativação uma função do tipo sigmóide que se faz necessária pela regra de aprendizado que utiliza uma função de ativação contínua, não-decrescente e diferenciável.

Conforme já observado, um dos principais aspectos relacionados ao projeto de redes MLP diz respeito à função de ativação utilizada. Diversas funções de ativação têm sido propostas para redes multicamadas. Estas funções são não lineares e diferenciáveis. As funções precisam ser diferenciáveis para que o gradiente possa ser calculado, direcionando o ajuste dos pesos. A função de ativação mais utilizada é sigmoideal logística.

#### **4.4.2.2 – Definição de uma Topologia Ideal para o MLP.**

Um algoritmo capaz de treinar os perceptrons multi-camadas é o backpropagation, segundo Rumelhart (1986).

Suas principais características são:

- Classe de tarefas: reconhecimento de padrões (ex.: controle adaptativo de braços de robôs) e processamento de fala;
- Propriedades dos neurônios: são do tipo perceptron e possuem valores contínuos. A função de ativação é a sigmóide;
- Propriedades das redes: rede acíclica de três camadas, no mínimo;
- Aprendizado: utiliza técnica de Correção de Erros com o uso da regra delta generalizada.

O algoritmo backpropagation foi testado em uma série de problemas clássicos, e em problemas relacionados com reconhecimento de padrões visuais. Na maioria dos casos, o algoritmo backpropagation encontrou boas soluções para os problemas propostos, apesar do algoritmo, às vezes, fornecer uma configuração de pesos correspondente a um mínimo local da função erro. Isto é devido ao fato do backpropagation utilizar o método do gradiente e, a princípio, a superfície de erro possuir uma forma qualquer.

Como já visto anteriormente, o algoritmo de retropropagação é utilizado para o treinamento do modelo dos perceptrons multi-camadas. Nesta seção, apresentam-se as

características básicas do algoritmo de retropropagação (*backpropagation*) o qual é o paradigma mais utilizado em áreas como reconhecimento de padrões, processamento de fala e na previsão de séries temporais.

#### 4.4.2.3 – Treinamento de Redes MLP.

Existem, atualmente, vários algoritmos para treinar rede MLP [RUMELHART & McCLELLAND, 1986; FAHLMAN, 1988; PEARLMUTTER, 1992; BARLETTA, 1991; HAGAN & MENHAJ, 1994]. Estes algoritmos são do tipo supervisionado. De acordo com os parâmetros que eles atualizam, os algoritmos para treinamento de redes do tipo MLP podem ser classificados em:

- Estáticos;
- Dinâmicos.

Como os algoritmos estáticos não alteram a estrutura da rede, variando apenas os valores de seus pesos, os algoritmos dinâmicos podem tanto reduzir quanto aumentar o tamanho da rede (número de camadas, número de nodos nas camadas intermediárias e número de conexões). Quando se utiliza o aprendizado estático, a mesma regra de aprendizado é empregada para redes do tipo MLP com diferentes tamanhos e formatos. Interessante observar que topologias diferentes podem resolver o mesmo problema.

O algoritmo de aprendizado mais conhecido para treinamento destas redes é o *back-propagation* [RUMELHART & McCLELLAND, 1986]. A maioria dos métodos de aprendizado para RNAs do tipo MLP utiliza variações deste algoritmo. O *back-propagation* foi um dos principais responsáveis pelo ressurgimento de interesse em RNAs, por ocasião da publicação do livro *Parallel Distributed Processing*, mais conhecido como PDP [RUMELHART & McCLELLAND, 1986].

O *back-propagation* é um algoritmo supervisionado, que utiliza pares (entrada, saída desejada) para, através de um mecanismo de correção de erros, ajustar os pesos da rede. O treinamento ocorre em duas fases, onde cada fase percorre a rede em um sentido. Estas duas fases são chamadas de fase *forward* e fase *backward*. Estão ilustrada estas duas fases na Figura 4.9.

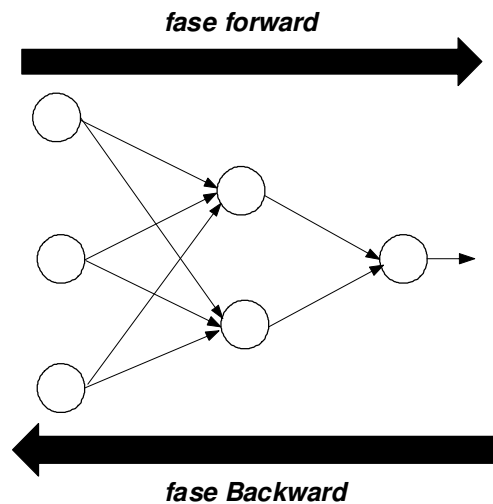


Figura 4.9 - Fluxo de Processamento do algoritmo back-propagation.

Apresenta três fases: a *forward*, a *backward* e a fase de atualização dos pesos da rede. Durante a fase *forward*, os sinais de entrada são propagados da camada de entrada para as próximas camadas intermediárias até chegar à camada de saída. A seguir, o erro na saída da rede é calculado através da comparação entre a saída atual (calculada) e a desejada.

Durante a fase *backward* (retropropagação do erro e cálculo dos ajustes dos pesos), o erro calculado na saída é usado para calcular o ajuste dos pesos da camada de saída, e então é retropropagado para a penúltima camada. Os nodos dessa camada escondida recebem esse erro ponderado pelos pesos da camada de saída.

O passo seguinte é calcular o erro para cada um desses nodos, em seguida calcular o ajuste dos pesos dessa camada e então retropropagar o erro para a camada anterior. Este processo se repete até que sejam calculados os ajustes para os pesos da primeira camada escondida. A última fase consiste em atualizar todos os pesos da rede, somando os ajustes calculados aos pesos correspondentes.

O *back-propagation* é baseado na regra proposta por Widrow e Hoff (1960), sendo também chamada de regra delta generalizada. Este algoritmo propõe uma forma de definir o erro dos nodos das camadas intermediárias, possibilitando o ajuste de seus pesos. Os ajustes dos pesos são realizados utilizando o método do gradiente.



#### 4.5 – Conclusão.

Os *perceptrons* de uma única camada resolvem apenas problemas linearmente separáveis, ao passo que um grande número de aplicações importantes são não-linearmente separáveis que são resolvidas por MLP, como é o caso da modelagem da turbina hídrica.

O treinamento (ou aprendizado) de uma rede neural MLP é realizado de maneira supervisionada com o algoritmo *back-propagation* (ou retropropagação do erro). Nesse algoritmo, as vantagens são que é simples de implementar, possui uma boa capacidade de generalização e poder de aproximação universal, ou seja, dada uma função contínua, a rede pode ser treinada para aproximar a função o quanto se queira.

De acordo com tais características, foi feita esta escolha do algoritmo *Back-propagation* para desenvolver a metodologia proposta e detalhada no próximo capítulo, para desenvolvimento da modelagem das turbinas hídricas para obtenção das curvas de colina usando RNA.

## 5 – METODOLOGIA PROPOSTA PARA OBTENÇÃO DAS CURVAS DE COLINA USANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS.

### 5.1 - Introdução

Dentre os algoritmos desenvolvidos em uma gama de possibilidades de RNAs, para o tipo de aplicação deste trabalho, destacam-se os algoritmos de retropropagação ou *back-propagation* e dos mínimos quadrados aplicados às redes neurais artificiais, que são sistemas computacionais que conseguem imitar as habilidades do sistema nervoso biológico, utilizando um grande número de neurônios artificiais simples, conectados entre si. Estes algoritmos serão utilizados na metodologia proposta para obtenção das curvas de colina na modelagem de turbinas hídricas que serão detalhadas ao longo deste capítulo.

### 5.2 - O modelo da RNA para a determinação das curvas de colina: A rede “Back-Propagation” utilizada no programa.

A rede *back-propagation* será utilizada para o desenvolvimento do programa computacional utilizado para o levantamento de diagrama de colinas de turbinas hidráulicas.

As redes neurais artificiais diferem-se quanto ao tipo de neurônio empregado, quanto à dinâmica e quanto ao processo de treinamento. Entende-se por treinamento o ajuste dos pesos das funções matemáticas que interpolam o fenômeno físico em estudo, utilizando um algoritmo iterativo com o uso de uma função objetivo minimizada ou função transferência.

A figura 4.2 mostra a estrutura de um neurônio artificial. Como pode ser observado, cada neurônio pode ser interpretado como um operador matemático de uma única saída e diversas entradas conectadas nas saídas de outros neurônios. Cada conexão apresenta um valor característico conhecido como *peso*, que quantifica sua participação na rede como um todo. O treinamento da rede, neste caso, é o responsável pelo ajuste dos pesos ( $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ ). Conseqüentemente, o neurônio pondera o somatório dos sinais de entrada que são usados na função de transferência ou função de ativação  $f$ , através de uma transformação dinâmico-linear  $L$ , LOESCH (1996).

A dinâmica linear, que pode ou não estar presente da modelagem de um neurônio, é definida como a integral de convolução, aplicada aos valores de entrada, ou seja:

$$Z(t) = \int_{-\infty}^t h(t - t') \cdot X(t) \cdot dt \quad (5.1)$$

Onde  $t$  é a interação no instante atual,  $t'$  é a interação nos instantes anteriores,  $dt$  é a taxa de interação,  $h(t - t')$  é a grandeza desejada de saída de neurônio calculadas em interações sucessivas, podendo ser uma função linear, exponencial e hiperbólica e  $X(t)$  é a soma ponderada dos pesos  $w_1, w_2$  até  $w_n$  dos ajustes das grandezas de entrada  $x_1, x_2$  até  $x_n$ .

Quanto ao resultado da dinâmica linear, este é imediatamente aplicado a uma função de ativação  $f$ , LOESCH (1996). A figura 5.1 mostra as funções de ativação mais utilizadas numa rede tipo BPN.

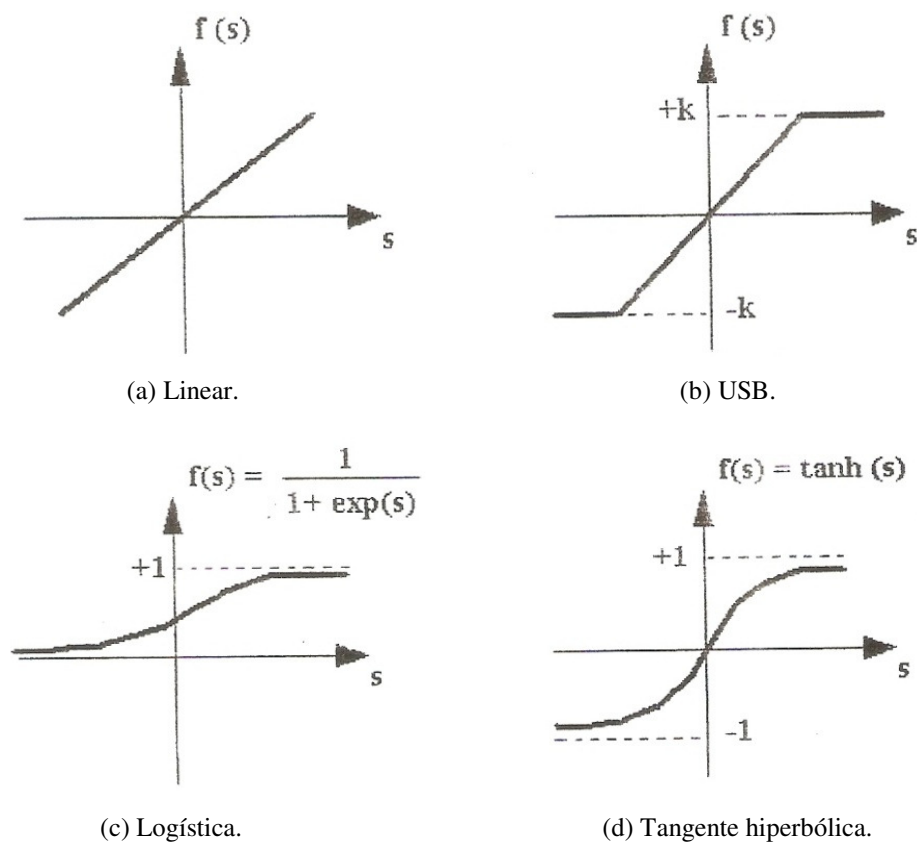


Figura 5.1 – Exemplos mais comuns de funções de transferências utilizadas em sistemas computacionais de redes neurais. (a) linear; (b) USB; (c) Logística; (d) Tangente hiperbólica. (LOESCH, 1996).

O treinamento de uma rede pode ser realizado de várias formas e pode diferir, caso a rede seja do tipo *estática* ou *dinâmica*. Entende-se por rede estática aquela em que os neurônios não possuem realimentação. Entretanto, dentro das próprias redes estáticas, podem ser encontrados muitos algoritmos distintos de treinamento.

Os principais algoritmos de treinamento de uma rede estática (alimentação direta) são:

- a) Mínimos quadrados recursivos;
- b) Algoritmo do gradiente;
- c) Filtragem estocástica;
- d) Adaptações do método de Newton.

De acordo com Loesch (1996), no cálculo do erro existente na estimativa dos pesos das conexões entre as camadas adjacentes aos neurônios, todos os algoritmos, acima citados, utilizam a retro-propagação ou *Back-Propagation*. O erro, durante o treinamento de uma rede neural, é definido como sendo a diferença entre os valores padrões de treinamento, dados experimentais dos ensaios, por exemplo, e aqueles gerados na saída da rede, após um determinado intervalo de tempo das interações.

O algoritmo do gradiente, por exemplo, é o mais difundido e utilizado para o treinamento da rede BPN, devido, basicamente, ao seu alto grau de paralelismo ou menor erro tangível durante a atualização dos pesos.

Segundo Carrara (1997), a grande diferença entre os algoritmos de treinamento do gradiente e dos mínimos quadrados é que, no primeiro, o erro quadrático de todas as saídas é minimizado nas interações e, no segundo, o erro em cada saída é considerado isoladamente. Conforme a arquitetura do neurônio, o treinamento necessita ser inicializados a partir de valores sorteados, aleatoriamente, de modo iterativo, ao longo de determinado intervalo de tempo para ajustar os valores dos pesos. Os neurônios que apresentam esta característica de inicialização são chamados Neurônios de Viez.

Segundo Loesch (1996), quanto mais complexo o fenômeno físico em estudo, mais necessita-se organizar os neurônios, segundo o modelo biológico do córtex cerebral, baseado em camadas de neurônios para constituir a rede. Conseqüentemente, podem existir redes formadas por duas ou mais camadas que, por sua vez, podem ser construídas por dois ou mais neurônios, em que as duas entradas, como é mostrado na figura 5.2.

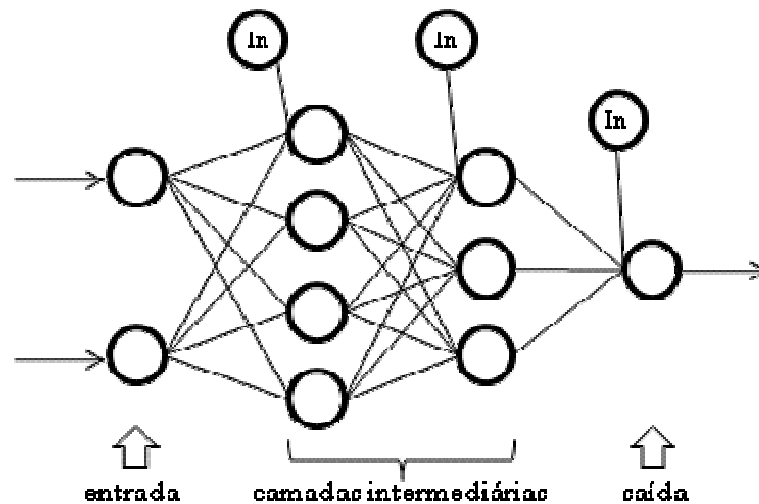


Figura 5.2 – Exemplo comum de rede de duas camadas de neurônios apresentando duas entradas e uma saída.

### 5.3 - Turbinas hidráulicas com melhor aplicação da técnica de modelagem para sistemas em velocidade ajustável.

A turbina hidráulica é projetada para operar sob uma determinada altura de queda, com velocidade definida, produzindo a potência desejada correspondente a uma vazão determinada. Entretanto, estando à turbina em operação, as condições físicas não correspondem às condições de projeto durante todo o período operativo, sendo apenas a velocidade mantida fixa, como mencionado anteriormente. A altura do nível de água nos reservatórios varia em função das vazões dos rios, podendo permanecer por longo tempo fora do valor de projeto. A potência elétrica requerida também varia conforme a demanda. Assim, o ponto de operação da turbina pode afastar-se do ponto de máximo rendimento.

No caso da figura 5.3 abaixo, o ponto  $P_f$  indicado mostra a operação da turbina em rotação fixa, com uma vazão  $Q$  e rotação  $A'$ . Nestas condições tem-se um rendimento aproximado de 88% de acordo com a curva de rendimento.

Para o caso desta turbina continuar operando com a mesma vazão e a rotação for ajustada para o ponto mostrado por  $P_a$ , verifica-se um aumento de rendimento, pois neste ponto a curva de rendimento já adota o valor de 89%, determinando-se o valor adequado e de máximo rendimento para este caso particular de vazão e rotação.

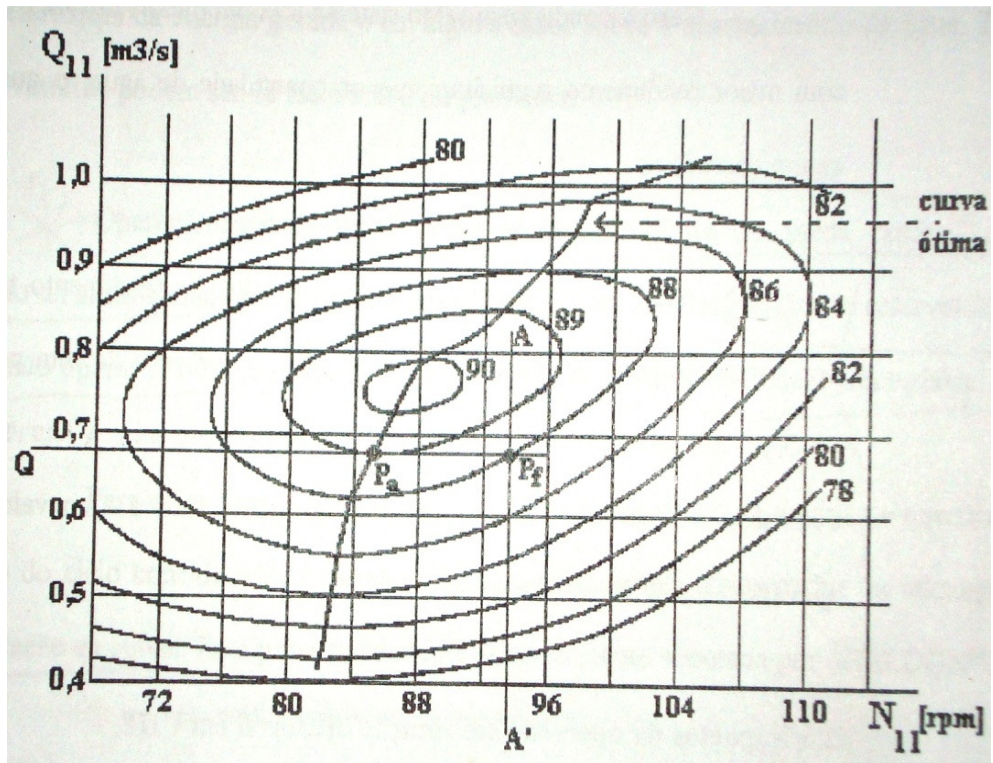


Figura 5.3 – Princípio conceitual da operação em rotação ajustável (SAIDEL, 1995).

No caso da figura 5.4, o ponto  $(Q_p, N_p)$  é a condição ótima de operação. Uma variação de vazão corresponde ao deslocamento do ponto ótimo para cima ou para baixo no segmento  $AA'$ , conseqüentemente, a diminuição do rendimento. Caso seja aplicada a definição de velocidade ajustável, busca-se a rotação para que a operação esteja no caso de maior rendimento do que no caso de rotação fixa.

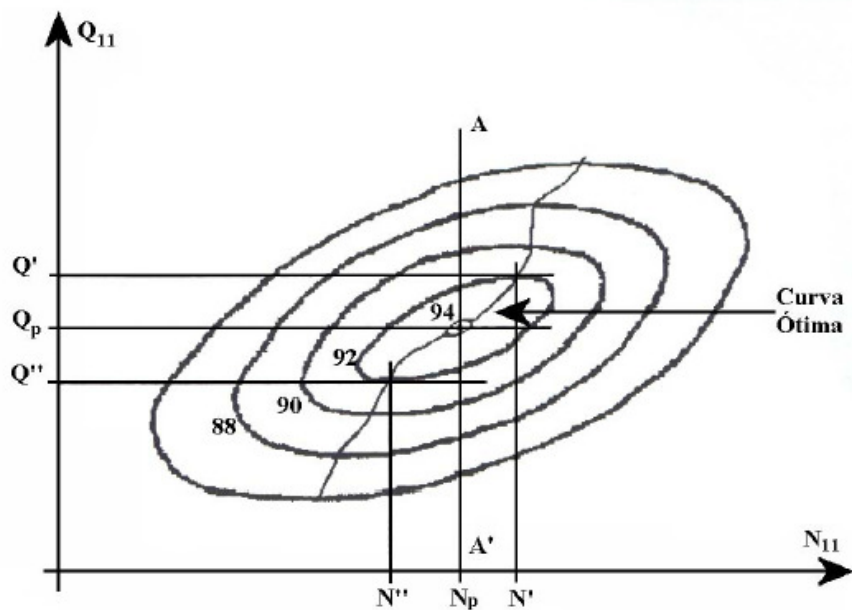


Figura 5.4 – Aumento do rendimento pela variação da rotação (SAIDEL, 1995).

Neste sentido verifica-se que nas duas figuras anteriores que há um ganho energético, pensado em duas maneiras distintas, podendo gerar mais energia com a mesma quantidade de água ou gerar a mesma energia com menor quantidade de água, e, portanto, com menor área alagada. Nos dois casos, o ajuste de rotação da turbina que possibilita estas situações de maior rendimento.

A região de operação da turbina pode ser visualizada através de curvas de colina, como mostradas nas figuras 5.3 e 5.4, e conforme já visto, são representadas pelos valores de rotação unitária, ou seja, são estabelecidas curvas de rendimento em função da vazão, para um dado valor de rotação unitária. Para valores de rotação ( $N$ ) estão associados valores de vazão turbinada ( $Q$ ) que permitem, por meio de interpolação, definir o rendimento da turbina.

Geralmente, as vantagens da operação em velocidade variável são encontradas na turbina Francis de alta velocidade específica e nas turbinas Kaplan e Propeller, conforme mostrou Cuesta et al. (2000) em suas pesquisas pontuada na figura 5.5 abaixo e na seção seguinte mais detalhadamente mostrada.

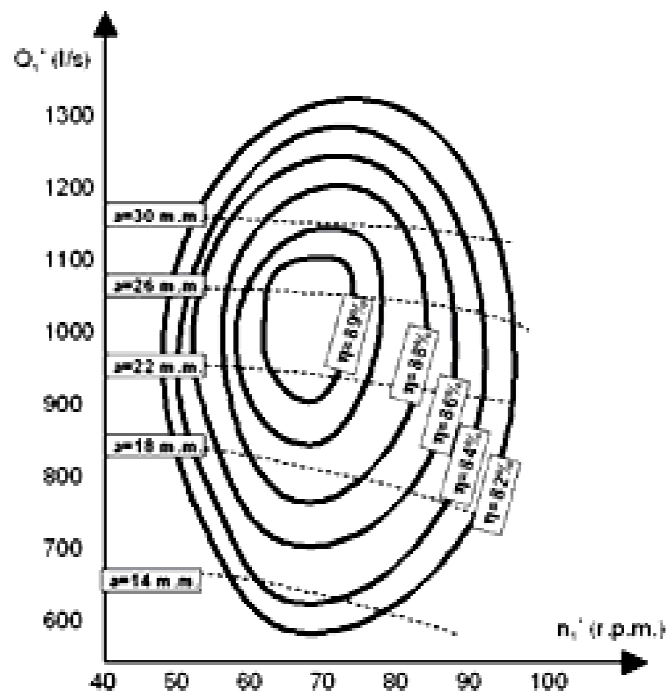


Figura 5.5 – Curvas de Colina (CUESTA, et. al, 2000).

### 5.3.1 - Turbinas Francis.

Na figura 5.5, as curvas de colina de uma turbina Francis típica são representadas em valores unitários de rotação ( $n_1$ ) e vazão ( $Q_1$ ). Nessa figura, pode-se observar claramente que há uma queda de eficiência apreciável se  $n_1$  ou  $Q_1$  se afastam dos valores da curva ótima. Em uma turbina de velocidade fixa, isso ocorre quando a altura de queda  $H$ , ou a vazão  $Q$ , variam.

Contudo, se essa variação de  $H$  e  $Q$  modificou a velocidade,  $n$ , a eficiência poderia ser otimizada para oferecer melhores condições de operação.

Além disso, o ajuste da velocidade evitaria outros problemas que surgem quando variações da altura são excessivos, provocando oscilações da pressão de ar no tubo e cavitações (Merino et. al, 1996).

### 5.3.2 - Turbinas Propeller e Kaplan.

A dupla regulação da Turbina Kaplan permite manter altos valores de eficiência em uma larga escala de valores de altura e vazão. A Turbina Propeller possui pás fixas que oferece custos consideravelmente menores do que a Turbina Kaplan (Barros, et. al, 1996).

Contudo, a eficiência diminui radicalmente para valores de carga fora da escala da vizinhança da potência nominal. Como visto anteriormente, a operação em velocidade ajustável da Turbina Propeller aumenta o desempenho, embora mantendo abaixo da turbina Kaplan.

Além disso, em algumas configurações de sistemas seria possível operar sem a porta do distribuidor, com a regulação fornecida pela velocidade.

Então, a operação em velocidade ajustável da turbina Propeller deve ser uma boa alternativa comparada à turbina Kaplan devido à sua maior simplicidade de construção e robustez, enquanto ainda mantém um bom desempenho.

## 5.4 – A Aplicação teórica das Redes Neurais na determinação do Diagrama de Colinas de turbinas hidráulicas: o programa *curvas\_colina\_rna* proposto.

Durante longo tempo, a confecção das curvas de colina era realizada de forma manual, utilizando-se papel milimetrado. Com o desenvolvimento da informática e o aparecimento de vários pacotes gráficos, algumas técnicas foram aperfeiçoadas para o traçado de gráficos, mas as curvas de colina, que envolve várias variáveis em plano, ainda é objeto de estudo. Em



laboratórios internacionais, já se utiliza o *software* MatLab® para o traçado desse tipo de diagrama.

Tazinaffo (1998) apresentou uma técnica de traçado de diagramas de colinas para bombas centrífugas utilizando a teoria das redes neurais, obtendo bons resultados.

Com base na proposta de Tazinaffo (1998) e Alencar (1999), desenvolveu-se aqui uma metodologia para o traçado de diagramas de colinas em turbinas hidráulicas operando em velocidade ajustável, utilizando-se redes neurais, auxiliada pelo *software* MatLab®, a partir de pontos de operação obtidos em ensaios realizados por Alencar (1999). Portanto, o programa desenvolvido neste trabalho utilizando esta metodologia para o traçado de curvas de colina, ou curvas de rendimento, será chamado de *curvas\_colina\_rna*.

Para determinar o diagrama de colinas de uma turbina hidráulica através do programa *curvas\_colina\_rna*, foi utilizada uma rede constituída por duas camadas, tal como é mostrada na figura 5.6. Outros arranjos foram testados, porém esta arquitetura mostrou ser mais estável aos resultados obtidos com o *software* MATLAB®, que apresenta algumas funções típicas de redes neurais.

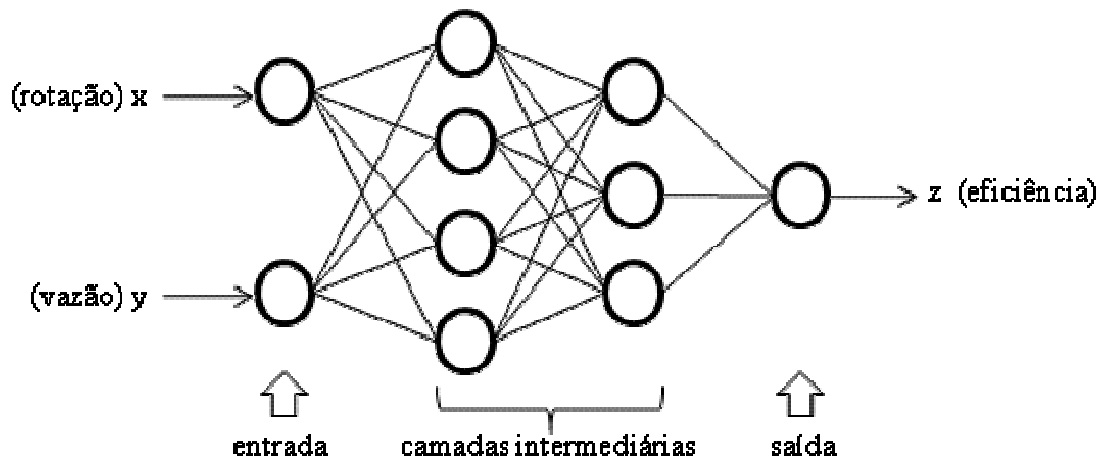


Figura 5.6 – Exemplo da rede do programa apresentando duas entradas ( $x$  e  $y$ ) e uma saída ( $z$ ).

Da figura 5.6, as variáveis de entrada são  $x$  e  $y$  representam, respectivamente, as grandezas obtidas experimentalmente, a rotação  $n$ , em RPM, e a vazão  $Q$ , em  $\text{m}^3/\text{s}$ . A grandeza de saída, após sucessivos treinamentos da rede, é a variável  $z$ , que representa a grandeza rendimento da turbina NT adimensional.

No MATLAB®, quanto aos algoritmos de inicialização com sorteio e treinamento, foi utilizado o *TRAINLM* que é a função interna do MATLAB® para treinamento da rede, baseadas no Back-Propagation. As funções de transferência, disponíveis no MATLAB®, que foram utilizadas no programa, são o *TANSIG* que é a função de transferência de ativação da

camada, baseada na função matemática tangencial sigmóide e a *PURELIN* que é a função de transferência linear que calcula a saída da camada de acordo com a entrada.

A função que cria uma rede de retroalimentação “backpropagation” é a *NEWFF* e a função interna *SIM* fará a simulação para posterior plotagem dos valores de saída em relação aos objetivos da programação. O número de épocas utilizadas no treinamento é igual a 50.

Conseqüentemente, as funções de transferência *f* utilizadas possuem a seguinte forma:

$$f = \frac{1}{1+W_{11}.\exp (g_1)+W_{21}.\exp (g_2)} \quad (5.2)$$

Onde: *W* representa os pesos das conexões entre os neurônios das camadas ( $w_{11}$  e  $w_{21}$ ) e *g* são variáveis de entrada ( $g_1$  e  $g_2$ ).

Após a modelagem da turbina Francis no MATLAB<sup>®</sup> utilizando redes neurais artificiais, em uma usina hídrica com altura de queda d’água variando de 8 m a 12 m, conforme etapas descritas anteriormente, foram realizadas simulações para comprovar a eficácia do programa de determinação do diagrama de colinas. O programa *curvas\_colina\_rna* é mostrado abaixo, com valores da turbina Francis e uma altura de queda de 12 m:

Programa *curvas\_colina\_rna*:

*%Pontos aquisitados do ensaio da turbina hidraulica tipo francis*

*%n (rotacao) Q (vazao) ef(eficiencia)*

*%este programa tem o objetivo de interpolar*

*%o diagrama de colina usando as ferramentas de redes neurais do matlab*

*clear all*

*% datateo = valores experimentais obtidos em laboratório UNIFEI*

*datateo=[1314 0.248 52.5;*

*1247 0.249 57.5;*

*1145 0.250 61.8;*

*1111 0.245 63.1;*

*1013 0.239 73.8;*

*970 0.244 66.1;*

862	0.244	64.9;
754	0.242	61.1;
652	0.243	54.6;
608	0.237	53.1;
530	0.236	47.6;
1304	0.235	64.5;
1226	0.234	69.7;
1101	0.236	75.4;
1090	0.232	76.1;
988	0.229	78.8;
879	0.227	73.4;
766	0.224	70.9;
724	0.227	64.6;
666	0.223	60.4;
558	0.222	51.1;
1287	0.174	62.6;
1238	0.220	69.7;
1141	0.202	78.1;
1040	0.218	84.2;
930	0.215	81.2;
882	0.213	79.1;
825	0.213	76.1;
730	0.214	70.7;
651	0.215	61.6;
602	0.212	57.1;
1230	0.199	59.1;
1158	0.198	66.0;
1099	0.195	71.2;
989	0.199	74.2;
851	0.198	72.3;
810	0.194	70.2;
742	0.196	66.1;
730	0.187	60.2;
620	0.191	55.8;

548	0.193	49.0;
1145	0.179	58.5;
1128	0.181	63.6;
1010	0.180	66.3;
880	0.175	64.5;
725	0.174	60.4;
666	0.170	56.1;
576	0.173	52.6;
561	0.172	49.4;
1090	0.155	55.1;
993	0.153	58.6;
906	0.148	57.4;
839	0.152	56.1;
700	0.151	54.1;
699	0.147	49.6;
638	0.148	46.7;
638	0.148	46.7]

```
gra = datateo;
```

```
clear datateo;
```

```
x=gra(:,1)/1;
```

```
y=gra(:,2);
```

```
z=gra(:,3)/100;
```

```
n=1:1:max(size(x));
```

```
x=x';
```

```
y=y';
```

```
z=z';
```

```
matriz=[n;x;y;z];
```

```
matriz=matriz';
```

```
%1) Tratamento dos valores calculados por incert.m
```

```
P1=matriz(:,2)';
```

```

P2=matriz(:,3)';
P=[P1;P2];
T=[matriz(:,4)]';
%2) Inicializacao dos pesos das duas camadas (1) e (2)
% Treinamento e criação da rede neural
net = newff(minmax(P),[5 1],{'tansig' 'purelin'});
net.trainParam.epochs = 50;
net = train(net,P,T);
Y = sim(net,P);

%4) Simulacao apos treinamento
s=100; %nº de pontos da grade
ab=linspace(min(x),max(x),s); %dominio em x com s subdivisoões
co=linspace(min(y),max(y),s); %dominio em y com s subdivisoões
[AB,CO]=meshgrid(ab,co); %malha quadrada bidimensional

% %Funcao interna do matlab para a simulacao na rede--simuff
for i=1:s
    p=[AB(:,i),CO(:,i)]';
    f = sim(net,p);
    EF(:,i)=f';
end

%5) Geracao das curvas de eficiencia no dominio AB,CO e EF
% curvas de eficiencia 85, 80, 75, 70, 65, 60, 55 e 50 por cento
figure(1)
plot(x,y,'*r') % Plotagem dos pontos experimentais (* vermelho)
axis([min(x) max(x) min(y) max(y)]);
hold on
contour (AB,CO,EF,[.4 .5 .6 .7 .8 .85],'b'); % cores dos contornos EFIC
contour (AB,CO,EF,[.45 .55 .65 .75],'r'); % cores dos contornos EFIC

%6) INDICACAO PONTO DE MAXIMO RENDIMENTO
ZZ=max(max(EF));

```

```

A=size(EF); %vetor das dimensoes em x e y :
size(EF)==size(AB)==size(CO) %SEMPRE DA ERRO COM SIZE(EF)
for i=1:A(1)
    for j=1:A(2)
        if ZZ==EF(i,j)
            XX=AB(i,j);
            YY=CO(i,j);
        end
    end
end
end
plot(XX,YY,'Xb'); % cor do "X" de max eficiencia
xm=min(min(AB))-(max(max(AB)))-(min(min(AB)))*10;
ym=min(min(CO))-(max(max(CO)))-(min(min(CO)))/10;
plot([XX XX xm],[ym YY YY],':b'); % cor da linha de max efíc

%7) Insercao dos nomes: EIXOS E TITULOS do grafico
title('Diagrama de Colina - queda constante');
xlabel('rotação *[rpm]');
ylabel('Vazão [m³/s]');
grid
% impressao dos resultados - principais valores de operacao
D=['Resultados: principais valores de operacao:']
XXs=num2str(XX*1);
YYs=num2str(YY);
ZZs=num2str(ZZ*100);
D1=[ 'Rotacao otima= ' XXs '(rpm) ' ]
D2=[ 'Vazao otima= ' YYs ' m³/s ' ]
D3=[ 'Eficiencia maxima= ' ZZs ' % ' ]

```

### 5.5 - Resultados obtidos a partir da simulação do programa *curvas\_colina\_rna*.

Primeiramente foram aqusitados os pontos de ensaios realizados no Laboratório Hidromecânico para Pequenas Centrais Hidrelétricas – LHPCH, mostrado na figura 5.7 da

Escola Federal de Engenharia de Itajubá – EFEI, por Alencar (1999), sendo que estes pontos foram utilizados para compor o programa de modelagem da turbina hidráulica.

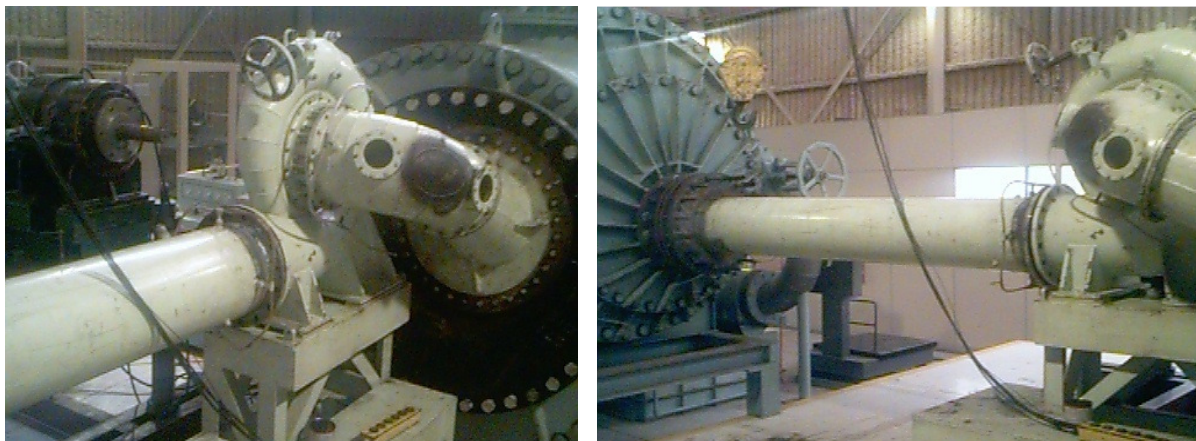


Figura 5.7 - Laboratório Hidromecânico para Pequenas Centrais Hidrelétricas – LHPCH. (Alencar, 1999).

Conforme o autor observa, as realizações dos ensaios apresentaram as seguintes condições: i) Para a rotação da turbina abaixo de 650 rpm, verificou-se o aumento da instabilidade do sistema, caracterizado pelas vibrações mecânicas, então evitou-se valores inferiores a este;

ii) Foram utilizadas alturas de queda constante, com valores de 8 m, 10 m e 12 m, respectivamente.

Os pontos utilizados foram as grandezas, rotação  $n$ , em RPM, vazão  $Q$ , em  $m^3/s$  e a grandeza de saída, após sucessivos treinamentos da rede que representa a grandeza rendimento da turbina  $\eta$ .

Para cada uma das grandezas foram obtidas 60 medições, que após interpolação foram utilizadas no programa computacional usando redes neurais artificiais.

Os resultados seguintes foram encontrados executando o programa *curva\_colina\_rna* criado para modelar as curvas de eficiência ou curvas de colina da turbina hidráulica.

O programa mostra os resultados obtidos, escrevendo os principais valores de operação após a simulação. Abaixo são mostrados estes resultados após as simulações realizadas, com os respectivos valores ótimos obtidos e os gráficos das curvas de colinas para cada altura especificada.

### 5.5.1- Simulação para altura de 8 m:

Na simulação de determinação do diagrama de colina são encontrados os valores de máximo rendimento, com a rotação e vazão ótimos e a máxima eficiência. Os valores estão mostrados abaixo.

Rotação ótima= 770.8485(rpm)

Vazão ótima= 0.1983 m<sup>3</sup>/s

Eficiência máxima= 71.6111 %

Além disso, como é objetivo do programa, é gerado um gráfico com as curvas de colina mostrado na figura 5.8 abaixo.

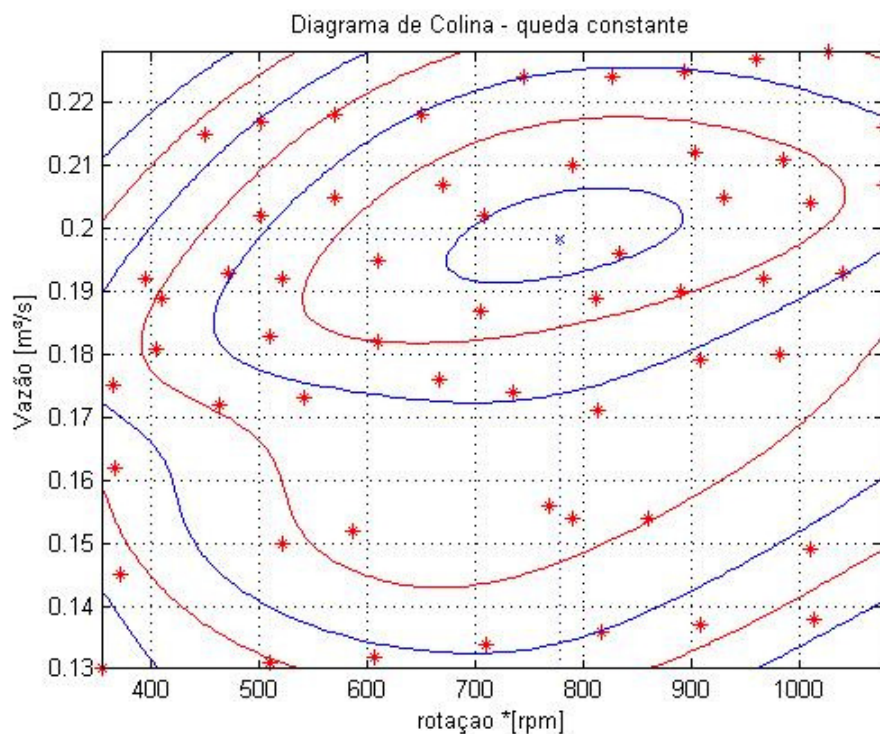


Figura 5.8 – Curvas de colina para altura de 8 m.

Como mostrado na figura 5.8, o gráfico representa as curvas de colina obtidas na simulação do programa. Na figura 5.9 abaixo, é mostrado o gráfico da curva de colina traçado de forma manual para a mesma situação de altura de queda constante igual a 8 m.



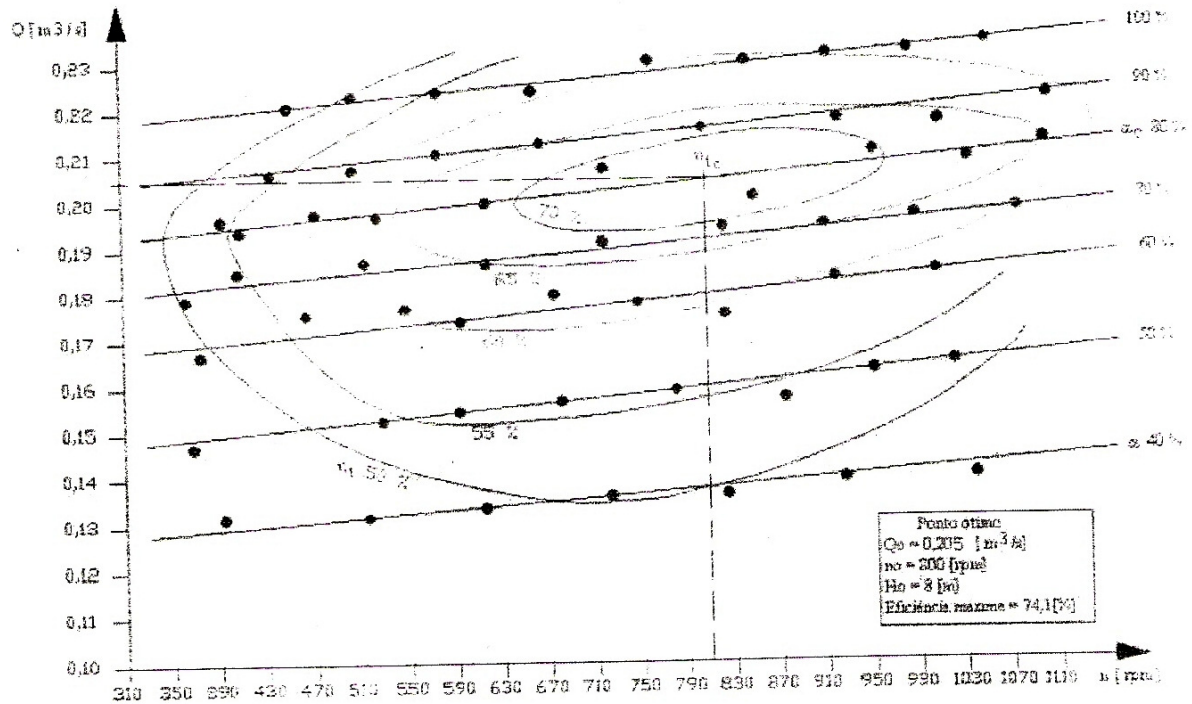


Figura 5.9 – Curvas de colina traçado de forma tradicional manualmente para  $h=8$  m (ALENCAR, 1999).

### 5.5.2- Simulação para altura de 10 m:

Semelhante ao ocorrido na simulação anterior, foi determinado o gráfico com os diagramas de colina, o qual mostra os valores de máximo rendimento, com a rotação e vazão ótimos e a máxima eficiência. Os resultados estão mostrados abaixo.

Rotação ótima= 832.55 (rpm)

Vazão ótima= 0.21494  $m^3/s$

Eficiência máxima= 74.5632 %

O gráfico com estes resultados é mostrado é na figura 5.10 a seguir:

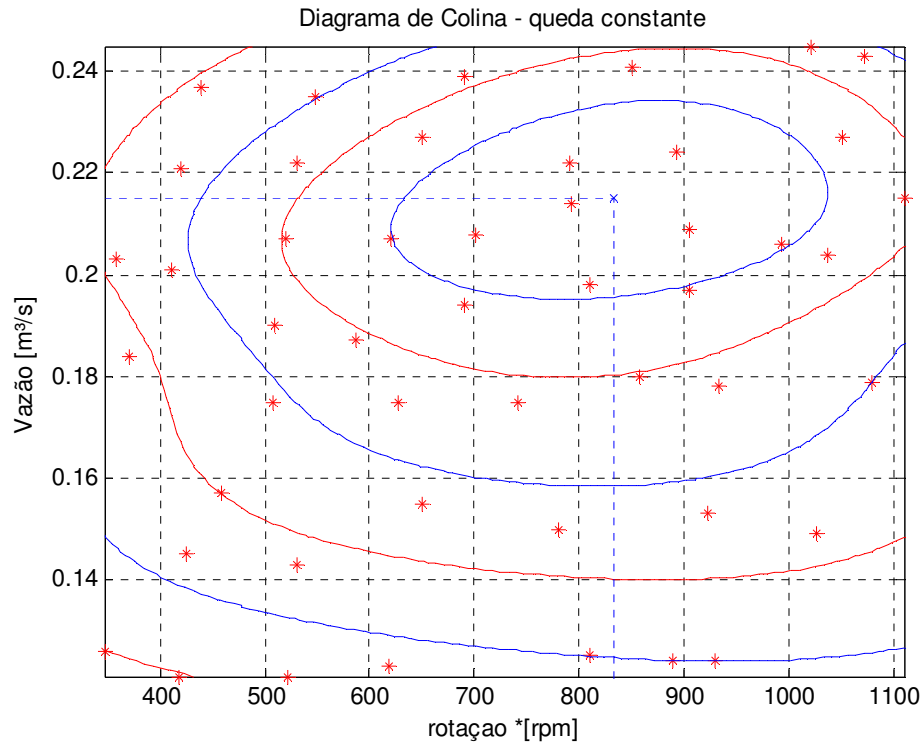


Figura 5.10 – Curvas de colina para altura de 10 m.

Na figura 5.11 abaixo, é mostrado o gráfico da curva de colina traçado de forma manual para a mesma situação de altura de queda constante igual a 10 m, segundo Alencar (1999).

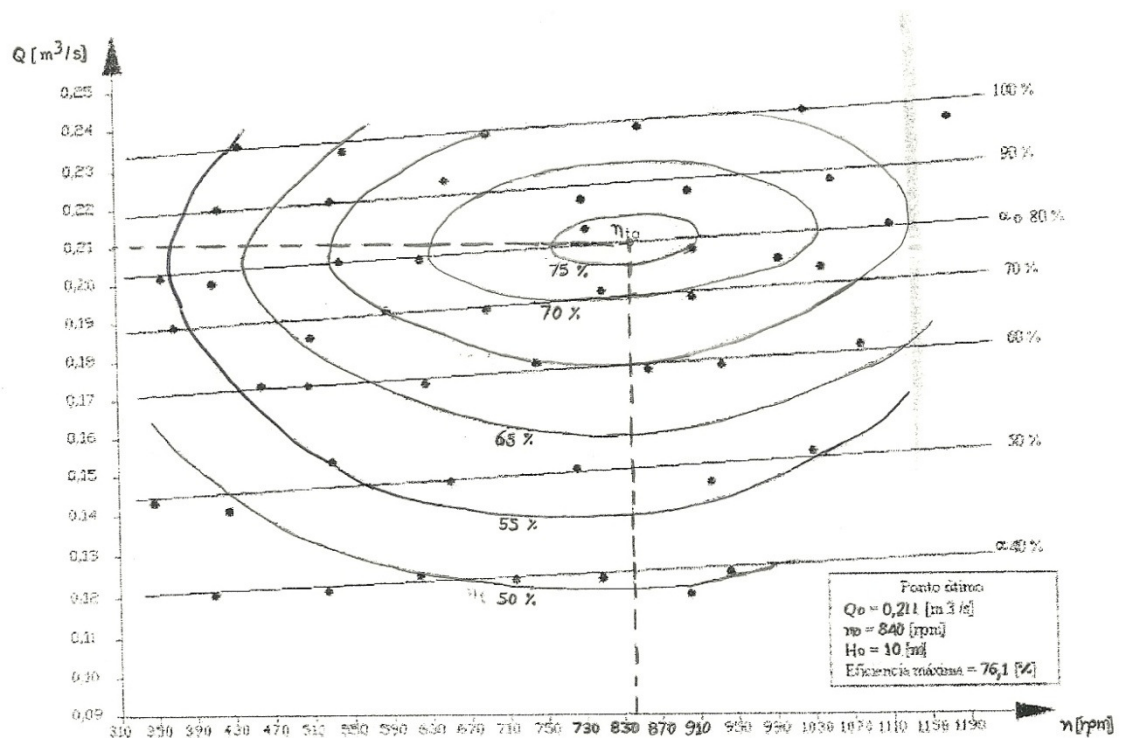


Figura 5.11 – Curvas de colina traçado de forma tradicional manualmente para  $h=10$  m (ALENCAR, 1999).

### 5.5.3- Simulação para altura de 12 m.

Na simulação para a altura de 12 m, foram encontrados os seguintes valores, que estão presentes também no gráfico da figura 5.12 abaixo.

Rotação ótima= 1029 rpm

Vazão ótima= 0.219 m<sup>3</sup>/s

Eficiência máxima= 83.18 %

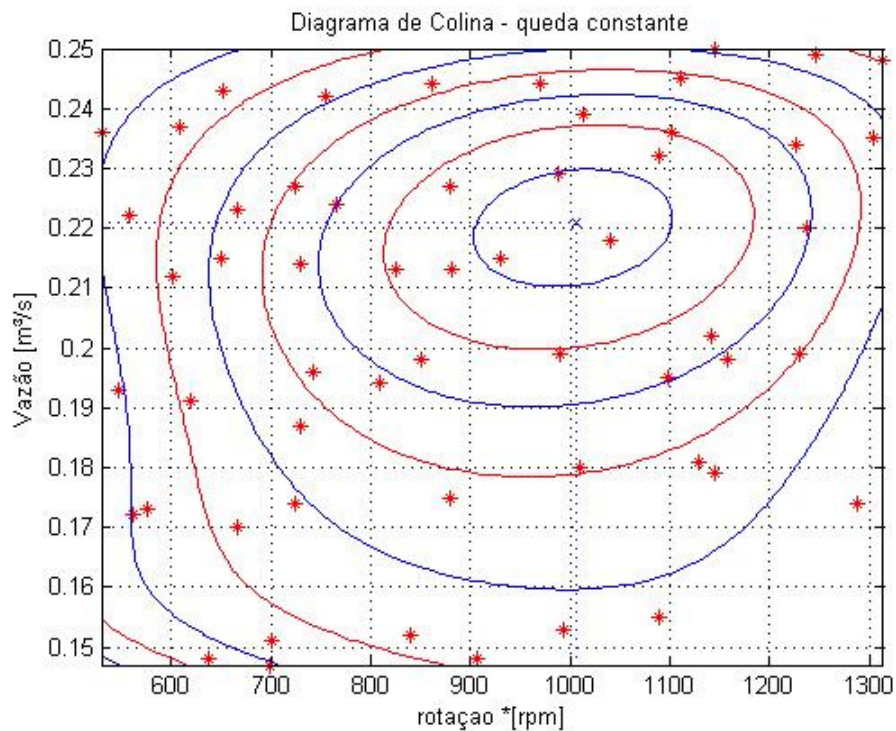


Figura 5.12 – curvas de colina para altura igual a 12 m.

Como mostrado na figura 5.12 acima, o gráfico representa as curvas de colina obtidas na simulação do programa. Na figura 5.13 abaixo, é mostrado o gráfico da curva de colina traçado de forma manual para a mesma situação de altura de queda constante igual a 12 m.

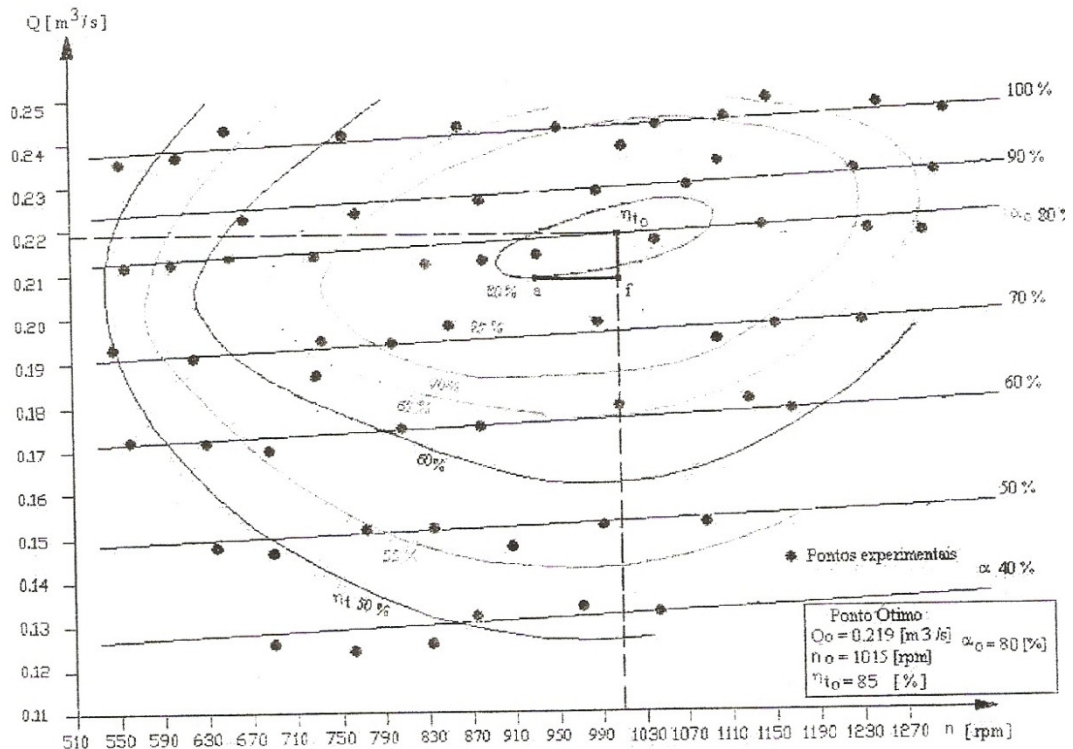


Figura 5.13 – Curvas de colina traçado de forma tradicional manualmente para  $h=12$  m. (ALENCAR, 1999).

Nota-se que nas simulações das seções 5.5.1, 5.5.2 e 5.5.3, os resultados obtidos são muito semelhantes àqueles realizados de forma manual mostrado por Alencar (1999), atingindo pontos de máxima eficiência muito próximos, mostrando que após as entradas, ativação das funções e treinamento da rede, a saída da rede oferece valores satisfatórios, que serão utilizados na modelagem da turbina hídrica e em um trabalho futuro, aplicar estes resultados em novo programa para verificar o comportamento de geradores DFIG e sua máxima extração de potência através de um sistema de velocidade ajustável.

Os resultados das simulações configuram que o traçado das curvas de colina de forma tradicional sendo desenhada manualmente em papel milimetrado, quando comparado aos modelos propostos por redes neurais, tem-se formas aproximadas.

## 5.6 – Conclusões.

A implementação desta metodologia de aquisição do diagrama de colinas, ou curvas de colina, ou ainda curvas de rendimento da turbina utilizando redes neurais ainda é pouco utilizada, mas é uma ferramenta útil e confiável.

Para a aquisição de resultados ainda mais próximos do real, seria necessária a aquisição de mais pontos do experimento e uma modelagem mais equivalente às condições reais de operação.

Houve ganhos de rendimentos considerável para o aumento de altura, permanecendo a vazão quase a mesma. A turbina passa a operar em melhores condições, com menor possibilidade de formação de vórtices e, conseqüentemente, menos vibrações.

O comportamento do modelo proposto estudado para rotação variável mostrou ganhos de rendimentos razoáveis, representando uma otimização da operação da turbina, portanto, pode ser uma ferramenta para a re-capacitação das centrais hidrelétricas que podem caracterizar-se pela variação da altura da queda em decorrência da topografia do reservatório ou do tipo de regularização implementada, que para PCHs é proposto que seja usada em usinas a fio d'água.

## **6 - CONCLUSÕES.**

### **6.1- Conclusões gerais.**

Na presente dissertação foi proposta uma metodologia para obtenção das curvas de colina para a modelagem da turbina hídrica. A modelagem foi efetuada através de redes neurais artificiais desenvolvidas no ambiente computacional MATLAB®, versão 6.0 para Windows 98, 2000, Me e XP, que possui as ferramentas necessárias para a implementação do programa que mostra a máxima eficiência de operação da turbina hídrica.

A utilização de modelos neurais para representar a modelagem das turbinas hídricas permite grande flexibilidade e viabilidade de aplicação em sistemas reais de pequeno porte, além do processo de treinamento ser simples. A estratégia de solução proposta por este trabalho favorece o desenvolvimento de redes neurais de baixa complexidade, tornando confiável o resultado apresentado pela rede.

Nota-se que nas simulações realizadas no capítulo 5, que os resultados das simulações configuram que o traçado das curvas de colina de forma tradicional sendo desenhada manualmente em papel milimetrado, quando comparado aos modelos propostos por redes neurais, tem formas bastante aproximadas, como mostrou Alencar (1999), atingindo pontos de máxima eficiência muito próximos, mostrando que após as entradas, ativação das funções e treinamento da rede, a saída da rede oferece valores satisfatórios, que serão utilizados na modelagem da turbina hídrica e em um trabalho futuro, aplicar estes resultados em novo programa para verificar o comportamento de geradores DFIG e sua máxima extração de potência através de um sistema de velocidade ajustável.

Na análise dos resultados, foram verificados ganhos de rendimento consideráveis para o aumento de altura, permanecendo a vazão quase a mesma. A turbina passa a operar em melhores condições, com menor possibilidade de formação de vórtices e, conseqüentemente, menos vibrações.

Mesmo com as vantagens proporcionadas pela técnica apresentada, à implementação desta metodologia de aquisição das curvas de colina da turbina utilizando redes neurais ainda é pouco utilizada, mas é uma ferramenta útil e confiável.

Para a aquisição de resultados ainda mais aproximados do real, seria necessária a aquisição de mais pontos em experimentos e uma modelagem mais equivalente às condições reais de operação.

O comportamento do modelo proposto estudado para rotação variável representou uma otimização da operação da turbina, portanto, pode ser uma ferramenta para a re-capacitação das centrais hidrelétricas que pode caracterizar-se pela variação da altura da queda em decorrência da topografia do reservatório ou do tipo de regularização implementada, que para PCHs é proposto que seja usada em usinas a fio d'água. É importante ressaltar que alguns dos estudos estabelecidos no presente trabalho têm destacada importância para os projetos de construção de novas UHE, ampliação e re-capacitação de centrais hidrelétricas existentes.

Por outro lado, os resultados aqui obtidos podem servir de base também para a inserção dos geradores duplamente excitados em esquemas hidráulicos de velocidade variável, tendo em vista a desregulamentação do mercado de energia no Brasil, que envolve a introdução da geração distribuída e leilões de energia para utilização de novas alternativas energéticas na matriz brasileira como as fontes renováveis de geração de energia elétrica.

## **6.2 - Sugestões para Futuros Trabalhos.**

- Utilizar as curvas de colina das turbinas para ser utilizada conjuntamente no processo de geração de energia extraíndo a máxima potência;
- Ensaiair em outros modelos de turbina com diferentes rotações para verificar o rendimento;
- Desenvolver um modelo real de central hidrelétrica em laboratório para aquisição de dados para modelagem da turbina;
- Realizar estudo da influência da operação de turbinas hidráulicas com rotação variável em centrais hidrelétricas que apresentam queda variável com relação à minimização do impacto ambiental;
- Realizar estudos de re-capacitação e/ou modernização de centrais hidrelétricas existentes aplicando a tecnologia proposta.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOYTES, F., ANDERSON, T., BEGOVOC, M. **Advanced Angle Stability Controls**. Conférence Internationale des Grands Réseaux Électriques a Haute Tension, Paris, France, 1999.

ALENCAR, H.S., **Análise do Comportamento de Turbinas Hidráulicas para Operar com Rotação Variável**. Dissertação de M.Sc., EFEI, Itajubá, Brasil, 1999.

ANA [Agência Nacional de Águas]. **Aproveitamento do Potencial Hidráulico para Geração de Energia**. Caderno de Recursos Hídricos. Brasília: ANA, 2005.

ANEEL. **Banco de Informações de Geração**. Banco de dados sobre empreendimentos para geração de energia elétrica no Brasil disponível em <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em abril de 2006.

ANEEL. **Resolução nº 223**. Brasília: 29 de Abril de 2003.

ANEEL. **Resolução nº 394**. Brasília: 04 de Dezembro de 1998.

BARBI, I., **Teoria Fundamental do Motor de Indução**. Editora da UFSC, 1985.

BARKER, P. P.; DE MELLO, R. W. **Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1- Radial Distribution Systems**. IEEE Power Technology, Inc., p. 1645-1656, 2000.

BARLETTA, R. **An Introduction to Case-based Reasoning**. AI Expert, p. 43-49, 1991.

BARRETO, J. M. & de Azevedo, F. M. **On the robot neural control**. Relatório técnico. Projeto MUCOM (Multisensory Control of Movement) do Programa ESPRIT de Pesquisa Básica, da CEE (Comissão Econômica Européia), Lab. of Neurophysiology, UCL, Bruxelas, maio 1993.

BARRETO, J. M. **Introdução às Redes Neurais Artificiais Primórdios e Realizações Contemporâneas**. In: 3º Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. Set. 1997: Vitória – ES, p. 1-48, 1997.

BEALE, R., JACKSON, T., **Neural Computing - An Introduction**. Adam Hilger Publishers. 1990.

BERMANN, C.; et al. **A Repotenciação de Usinas Hidrelétricas como Alternativa para o Aumento da Oferta de Energia no Brasil com Proteção Ambiental**. Brasília: WWF, 2004.

BLAIR, P.; WOZNIAK, L. **Non-Linear Simulation of Hydraulic Turbine Governor Systems**. Walter Power & Dam Construction, p. 23-26, 1976.



BOLDEA, I.; NASAR, S. A. **The Induction Machine Handbook**. CRC Press, New York, 1st edition, 2001.

BOYLE, G. **Renewable Energy: Power for a Sustainable Future**. New York: Oxford University Press, 1996.

BOYLESTAD, R. L., NASHELSKY, L., **Dispositivo Eletrônico e Teoria de Circuitos**. 6ª ed. Rio de Janeiro, Prentice-Hall do Brasil, 1998.

CEMIG, **Projeto Definitivo: Usina de Nova Ponte**. CEMIG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, julho de 1976.

CEMIG, **Projeto Executivo Relatório de integração Estudos Ambientais: Usina de Nova Ponte**. CEMIG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 1995.

CHAVES, J. R. A. et al. **Repotenciação do Parque Gerador Existente: Uma Alternativa de Baixo Custo e Reduzido Prazo de Implantação para Minimizar o Crescente Risco de Déficit de Ponta do Sistema**. In: XIV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Belém: Anais, 1997.

CYBENKO, G. **Approximation by Superpositons of a Sigmoid Function**. Mathematics of Control, Signals and Systems, 2:303-314, 1989.

CYBENKO, G. **Continuos Valued Neural Network with two Hidden Layers are Sufficient**. Technical Report, Departament of Computer Science, Tufts University, 1988.

DE AZEVEDO, F. M. **Contribution to the Study of Neural Networks in Dynamical Expert System**. Tese de Doutorado, Institut d'Informatique, FUNDP, Namur, Bélgica, 1993.

ELETROBRÁS. **Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro – SIPOT**. Informações (tabelas e mapas) referentes à atualização de julho de 2005 disponíveis em <<http://www.eletrabras.com.br>>. Acesso em julho de 2006.

EPE. **Balanço Energético Nacional 2005 – Ano base 2004**. EPE: Rio de Janeiro, 2005.

EPE. **Geração Hidrelétrica: Potencial Hidrelétrico Brasileiro**. Nota Técnica. Rio de Janeiro: EPE, 2006a.

EPE. **Geração Hidrelétrica: Caracterização Técnico-econômica**. Nota Técnica. Rio de Janeiro: EPE, 2006b.

EPE. **Estudos de Inventário e Avaliação Ambiental Integrada – AAI**. Apresentação em PowerPoint. Rio de Janeiro: EPE, 2006c.

EPE. **Geração Hidrelétrica e Fontes Renováveis**. Apresentação em Power- Point disponível em <<http://www.epe.gov.br/Estudos.html>>. Rio de Janeiro: EPE, 2006d.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica – PDEE 2006-2015**. Rio de Janeiro: EPE, 2006e.

FAHLMAN, S. E. **An Empirical Study of Learning Speed in Back-propagation Network**. Technical Report, Carnegie Mellow University, 1988.

FARELL, C.; GULLIVER, J. S. **Hydro mechanics of Variable Speed Turbines**. *Journal of Energy Engineering*, Volume 113, No. 1, p. 1 -13, 1987

FARIA, J.; MARGATO, E., RESENDE, M.J. **Induction Generator Excited by Voltage Source Inverter for Micro-Hydro Plants**. ICEM XVI International Conference on Electrical Machines, 5-8 September, Cracow, Poland, 2004.

FAUSETT, L. V. **Fundamentals of neural networks architectures, algorithms, and applications**. New Jersey: Prentice Hall, p. 461, 1994.

FERREIRA, J. C. C.; **Aplicação do Controle Vetorial e Teoria pq no Controle de Aerogeradores Conectados à Rede Elétrica**. Dissertação de Mestrado (COPPE/UFRJ), Rio de Janeiro – RJ, 2005.

FILHO, F. J. C. B. **Uma proposta de metodologia para acompanhamento do desempenho de turbinas hidráulicas tipo Francis**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC. Florianópolis, 1998.

FUKUSHIMA, K.. **Cognitron: A Self-Organising Multilayered Neural Network**. *Biol. Cybern.*, 23:121-134, 1975.

GE POWER, 2006. **Hydro Turbines**. Informações disponíveis em <[http://www.gepower.com/prod\\_serv/products/](http://www.gepower.com/prod_serv/products/)>.

GOMES, P.; SCHILLING, M. T.; LIMA, J. W. M., et al. **Geração Distribuída: Vantagens, Problemas e Perspectivas**. In: XV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Grupo VII Planejamento De Sistemas Elétricos, GPL/09. (Out. 1999: Foz do Iguaçu, Paraná). Anais. Foz do Iguaçu, p.5, 1999a.

GOMES, P.; SCHILLING, M. T.; LIMA, J. W. M., et al.; 1999b. **A Influência de Produtores Independentes de Energia no Desempenho do Sistema Elétrico Brasileiro**. In: XV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, GRUPO VII, GPL/08. (Out. 1999: Foz do Iguaçu, Paraná). Anais. Foz do Iguaçu, p.6, 1999b.

GROSSBERG, S. **Adaptive Pattern Recognition and Universal Recoding: Parallel Development and Coding of Neural Feature Detectors**. *Biol. Cybern.*, 24:121-134, 1976.

HAGAN, M.; M. Menhaj. **Training Feedforward Network with The Marquardt Algorithm**. *IEEE Transactions on Neural Networks*, p. 989-993, 1994.

HAMPSON, S. E. **Connectionistic Problem Solving: Computational Aspects of Biological Learning**. Berlin: Birkhauser, 1990.

HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e práticas**. 2 ed. Porto Alegre: Bookmann, 2001.

HEBB, D. O. **The Organization of Behavior**. Wiley, 1949.

HITACHI. **Hydro Turbine**. Informações disponíveis em <<http://www.pi.hitachi.co.jp/hydraulic-turbine/product>>. Acesso em 23 de julho de 2006.

HOPFIELD J. J. **Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Properties**. Proc. Nat. Acad. Sci., 79:2554-8, 1982.

IEA. **Key World Energy Statistics**. Paris: IEA, 2005.

KELBER, C.R., **Geração Hidrelétrica em Regime de Velocidade Ajustável Empregando Máquinas de Dupla Alimentação com Conversor Estático no Circuito Rotórico**. Dissertação de M.Sc., PUC/Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1997.

KOHONEN, T. **Self-organized Formation of Topologically Correct Feature Maps**. Biological Cybernetics, 1982.

LEFÉVRE, M. A. P. **Sistemas Inteligentes e sua Aplicação na Operação de Itaipu Binacional**. Eletroevolução, No. 7, p. 54-58, 1996.

LOESCH, C., **Redes Neurais Artificiais – Fundamentos e modelos**, Editora da Furb, Blumenau, 1996.

LIMA, G. A. G., Moraes R. M., Olivert J. A. **”Velocidade Ajustável: Maior Eficiência da Geração com Menor Impacto Ambiental”**, EM, 1997.

MME. Brasília. Disponível em <[www.mme.gov.br](http://www.mme.gov.br)>. Acesso em 02 de Fevereiro de 2009.

MCCULLOCH, W.S.; PITTS, W. **A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity**. Bulletin of Mathematical Biophysics, p. 115-133, 1943.

MENDEL, J. M.; MCLAREN, R. W. **Adaptive, Learning, and Pattern Recognition Systems; Theory and Applications**, chapter Reinforcement-learning control and pattern recognition systems, p. 287-318. New York: Academic Press, 1970.

MINSKY, M. L. **Steps Towards Artificial Intelligence**. In Proc. of the Institute of Radio Engineers 49, p. 8-32, 1961.

MINSKY, M.; PAPERT, S. **Perceptrons: an Introduction to Computational Geometry**. MIT Press, Massachusetts, 1969.

MORI, H. **State-of-the-art Overview on Artificial Neural Networks in Power Systems**. In: EL-SHARKAWI, M. A.; NIEBUR, D. Application of Artificial Neural Networks to Power Systems. Edited by M. A. El-Sharkawi and Dagmar Niebur, p. 51-58, 1996.

NATTA [Network for Alternative Technology and Technology Assessment]. **NATTA's Journal Renew.** n. 153, janfev 2005. Artigos diversos. Extrato disponível em <<http://eeru.open.ac.uk/natta/rol.html>>. Acesso em agosto de 2006.

NUNES, M. V. A.; ZÜRN H. H.; BEZERRA U. H.; 2003a. **Transient Stability Margin of Variable Versus Fixed Speed Wind Systems in Electrical Grids.** 2003 IEEEBOLOGNA POWER TECH CONFERENCE (23th – 26th June. Bologna, Italy). Proceedings. Bologna, 2003.

NUNES, M. V. A.; LOPES, J. A. P. L.; ZÜRN H. H et al. 2003b. **Influence of the Variable Speed Wind Generators in Transient Stability Margin of the Conventional Generators Integrated in Electrical Grids.** Artigo Aceito para Publicação na IEEE – Transactions on Energy Conversion, 2003.

NUNES, M. V. A. **Avaliação do Comportamento de Aerogeradores de Velocidade Fixa e Variável Integrados em Redes Elétricas Fracas.** Tese de Doutorado. Florianópolis. Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

ONS. **Informações sobre o sistema elétrico brasileiro.** Conjunto de informações disponíveis em <<http://www.ons.org.br>>. Acesso em julho de 2006.

PEARLMUTTER, B. **Gradient Descent: Second Order Momentum and Saturation Error.** In J. E. Moody, S. Hanson, and R. Lippmann, editors, *Advances in Neural Information Processing Systems 2*, p. 887-894. Morgan Kaufmann, 1992.

PELLEGRINI, CLAÚDIO DE C., SCOLA, LUÍS A., **Geração de Potência.** Tese de Livre Docência, Universidade Federal de São João Del-Rei, Brasil, 2005.

REIS, L.B., **Usinas Hidrelétricas com Rotação Variável – Opção Energética para Longa Distância, Aproveitamentos de Pequeno Porte e Reversíveis.** Tese de Livre Docência, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 1993.

RODRIGUES, R. N.; Finardi, E. C.; Silva, E. L. **Alocação de unidades hidrelétricas no problema da programação da operação energética utilizando relaxação lagrangeana e lagrangeano aumentado.** Revista Controle & Automação/Vol.17 nº 2/ Abril, Maio e Junho 2006.

ROSENBLATT, F. **The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain.** Psychol. Rev., p.386-408, 1958.

RUMELHART, D. E. and J. L. McClelland. **Parallel Distributed Processing.** Vol. 1: Foundations. The MIT Press, 1986.

RUMELHART, D. E., G. E. Hinton, and R. J. Williams. **Learning Representations by Back-propagation Error.** Nature, p. 323:533-536, 1986.

RUMELHART, D. E., WEIGEND, S. A., **Predicting the Future: A Connectionist Approach.** Stanford, 1990.

SAIDEL, M.A., **Rotação Ajustável em Usinas Hidroelétricas: Novas Premissas para o Planejamento Energético**. Tese de D.Sc., USP, São Paulo, SP, Brasil, 1995.

SANTOS, A. H. M., FILHO, G. L. T. **Metodologia simplificada para estudos dinâmicos de centrais hidrelétricas, visando à determinação das turbinas**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 2 nº2 Jul/Dez 1997.

SANTOS, Afonso Henriques Moreira. **As fontes alternativas de energia e o empresarismo descentralizado: potencialidades e obstáculos para a sua expansão no Brasil**. Itajubá: CERNE – UNIFEI, 2003.

SANTOS, C. M. P., COELHO, J. e DIAS, A. **Uma Contribuição Metodológica para a Modernização de Unidades Hidrogeradoras**. In XV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Foz do Iguaçu– PR: Anais, 1999.

SERAPHIM, Odivaldo José et al. **Tecnologia e Aplicação Racional de Energia Elétrica e de Fontes Renováveis na Agricultura**, Livro publicado no XXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Campina Grande: Editora SBEA, 1997.

SEYOUUM D., GRANTHAM C., RAHMAN M., **Inverter Supplied Voltage Control system for an Isolated Induction Generator driven by a Wind Turbine**, Industry Applications Conference, Vol.1, p. 568-575, 2003.

SILVEIRA, M. A. N.; MELLO, J. C. O.; SILVA, A. M. L.; 1999. **Avaliação do Impacto de Produtores Independentes na Confiabilidade de Sistemas de Transmissão e Geração**. In: XV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Grupo VII Planejamento de Sistemas Elétricos, GPL/12 anais. Foz do Iguaçu, 1999.

SKAPURA, D. M.; **Building neural networks**. 1<sup>st</sup> Edition. New York: Addison-Wesley, p. 286, 1996.

SOUZA, C. L.; NETO L. M.; GUIMARÃES, G. C. et al. **Análise da Estabilidade de Sistemas de Potência Empregando Geradores de Indução Equipados com Reguladores de Velocidade**. In: IX ENCONTRO REGIONAL LATINO AMERICANO DA CIGRÉ, COMITÊ 38, Anais. Foz do Iguaçu. p. 1-6, 2001a.

SOUZA, L. M. O.; **Geração Hidráulica em Velocidade Ajustável Utilizando Máquinas de Dupla Alimentação: Vantagens Ambientais e Operacionais**. Dissertação de Mestrado (COPPE/UFRJ), Rio de Janeiro – RJ, 2005.

STANO, Angelo, VIANA, Augusto Nelson Carvalho. **Curso PCHs**. Campinas: AGRENER 2002, 2002.

SUTTON, R. S.; A. G. Barto, and R. J. Willians. **Reinforcement Learning is Direct Adaptive Optimal Control**. In Proc. of the American Control Conference, p. 2143-2146, 1991.

SYCARA, K. **Using Case-Based Reasoning for plan Adaptation and Repair**. In Case Based Reasoning Workshop, DARPA, p. 425-434, Morgan Kaufmann, 1988.

TAZINAFFO, P. M., **Regulação de geradores de fluxo pela variação da Rotação**. Dissertação de Mestrado – Escola Federal de Engenharia de Itajubá. Itajubá, 1998.

TIAGO FILHO, Geraldo Lúcio, VIANA, Augusto Nelson Carvalho, LOPES, José Demerval. **Microusinas Hidrelétricas: Construção e Operação**. Itajubá: LHPCH – UNIFEI, 2000.

TIAGO, G.; NOGUEIRA, F.. **As Novas Diretrizes da Aneel para o Enquadramento das Pequenas Centrais Hidrelétricas**. UNIFEI, Itajubá, 2005.

TOLMASQUIM, M.T. (coord.). **Geração de Energia Elétrica no Brasil**. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2005.

ULITH, P., **Comportamento no Serviço das Turbinas Francis**. Anales del I Seminario de Ingeniería Hidromecánica, VOITH , 1976.

UNIDO [United Nations Industrial Development Organization]. **Hydropower: World Water Assessment Programme**. Disponível em <<http://wwap.unesco.org>>, atualizado em abril de 2004.

UNIDO [United Nations Industrial Development Organization]. **Hydropower: World Water Assessment Programme**. Disponível em <<http://wwap.unesco.org>>, atualizado em abril de 2004. Acesso em abril de 2006.

UTURBEY, W.; SIMOES COSTA, A. J. A. **Optimal Power Flow with Inter-Temporal Constraints as an Aiding Tool for Demand-Side Management**. IEE Proceedings, UK, v.149, n. 1 (Jan.), p. 37 –43, 2002.

VALE, Z. A. & RAMOS, C. **Temporal Reasoning in AI Applications for Power System Control Centers**. In: IFAC Control of Power Plants and Power Systems (SIPOWER'95, Cancun, Mexico). p. 297-302, 1995.

VARELLA, S., **Alterações em Turbinas Hidráulicas de Forma a Manter a Mesma Potência, Quando for Alterada a Rotação**. Dissertação de M.Sc., EFEI, Itajubá, Brasil, 1976.

VIANA, A.N.C., ALENCAR, H.S., **Análise Experimental de Turbinas Hidráulicas Operando com Rotação Variável**. Grupo de Trabajo Sobre Hidromecánica 5ª Reunión, Montevideo, Uruguay, 1999.

VIANA, F. G.; & VIANA, A. N. C. **Microcentrais hidrelétricas: alternativa às comunidades rurais isoladas**. Itajubá: PCH Notícias & SHP News, 2004.

VIEIRA, J. P. A., **Controlabilidade de Aero geradores Integrados em Redes Elétricas**. Dissertação de Mestrado, Belém, 2006.

VIVIER, L., **Turbines Hydrauliques et Leur Régulations**. Éditions Albin Michel, Paris, 1966.

WAIKAR, D. L; RAHMAN, F. **Assessment of Artificial Intelligence Techniques for Power System Protection**. Proceedings International Conference on Energy Management and Power Delivery, EMPD '98, Vol. 2, p. 436–441, 1998.

WEG – **Transformando Energia em Soluções**. <[www.weg.com.br](http://www.weg.com.br)>, acesso em 25 de junho de 2007.

WIDROW, B.; M.E. Hoff. **Adaptative Switching Circuits**. Institute of Radio Enginners. Western Electronic Show and Convention, 1960.