

**XXI CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
SÃO PEDRO, ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL, OCTUBRE, 2004**

**DETERMINAÇÃO DA VAZÃO MÍNIMA NO CURSO D'ÁGUA  
UTILIZANDO MÉTODOS MULTICRITERIAIS COMO AUXÍLIO À  
TOMADA DE DECISÃO**

**Leopoldo Uberto Ribeiro Junior**

Aluno de Doutorado da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, São Paulo -Brasil. Endereço: Rua Sinhazinha Lisboa 292, apto. 102, Bairro Medicina, Itajubá - Minas Gerais, CEP 37502 – 096, Tel: (35) 99552218. email:

[leopoldo@fec.unicamp.br](mailto:leopoldo@fec.unicamp.br)

**Afonso Henriques Moreira Santos**

Professor titular da Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Minas Gerais - Brasil. Endereço: Avenida BPS, 1303 Bairro BPS, Itajubá - Minas Gerais, CEP 37500 – 903, Tel: (35) 36291455. email:

[afonso@iee.efei.br](mailto:afonso@iee.efei.br)

**Edson da Costa Bortoni**

Professor adjunto da Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Minas Gerais - Brasil. Endereço: Avenida BPS, 1303 Bairro BPS, Itajubá - Minas Gerais, CEP 37500 – 903, Tel: (35) 36291401. email:

[bortoni@iee.efei.br](mailto:bortoni@iee.efei.br)

**RESUMO**

A matriz energética brasileira é composta, quase em sua totalidade, por geração hídrica, sendo que a maioria dos empreendimentos possuem potência instalada inferior a 30 MW e área de reservatório não excedente a 3 Km<sup>2</sup> sendo classificadas como Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCHs. Grande parte desses aproveitamentos tem como característica do arranjo, a localização da barragem distante da casa de força, pressupondo a formação de um “trecho curto-circuitado” do rio, chamado Trecho de Vazão Reduzida - TVR.

No entanto, a definição da vazão remanescente neste trecho vem sendo objeto de muita discussão entre empreendedores, interessados em uma pequena parcela de vazão a ser destinada a este percurso, que não estará disponível para a geração e órgãos ambientais, interessados em uma quantidade de água que acarrete o menor impacto.

Assim, este trabalho almeja, com auxílio dos métodos multicriteriais Programação por Compromisso (CP) e Teoria dos Jogos Cooperativos (CGT) dar um direcionamento científico ao entrave existente.

**ABSTRACT**

The Brazilian energy matrix is composed, almost in its totality, of water generation, being that the majority of the enterprises possess installed power inferior to 30 MW and a reservoir area not exceeding 3 Km<sup>2</sup> being classified as Small Hydropower Plants - PCHs. Great part of these exploitations has as characteristic of the arrangement, the a long the distance between dam and the power house, estimating the formation of a "short-circuited stretch" of the river, called Stretch Reduced Outflow - TVR.

However, the definition of the remaining outflow in this stretch has been the object of much controversy among the entrepreneurs, interested in a small portion of outflow to be destined to this stretch that will not be available for energy generation, and environmental institutes interested in an amount of water that may causes the lesser impact.

So this work pretend with assists of multicriteria methods Compromise Programming (CP) and the Cooperative Game Theory (CGT) give the right direction for the obstacle that exist.

**PALVRAS CHAVE**

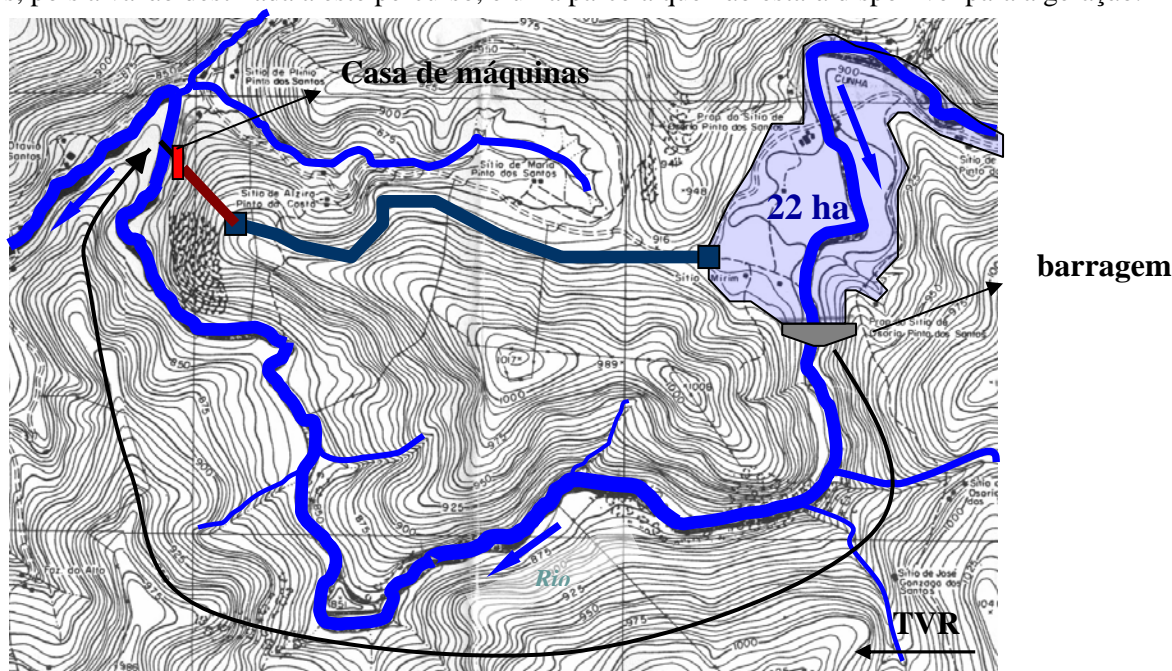
Pequenas Centrais Hidrelétricas, Métodos Multicriteriais, Vazão Mínima.

## INTRODUÇÃO

A opção pelas usinas hidrelétricas, foi a trajetória tecnológica escolhida pelo Brasil em razão da ampla disponibilidade de potenciais hidráulicos, a custos não excessivamente elevados e, sobretudo, em razão da falta de disponibilidade nacional de combustíveis fósseis. Hoje, a participação hidrelétrica, corresponde a 90 % da produção de energia elétrica no Brasil. Em termos mundiais, o óleo combustível derivado de petróleo e carvão mineral são responsáveis em conjunto por mais de 60% da produção de energia elétrica, sendo o carvão mineral, individualmente, responsável por mais de 40% da produção.

Assim, a matriz energética, utilizando com fonte primária a água, se baseia na existência de dois tipos básicos de empreendimentos de geração hidrelétrica, os que formam uma queda artificial, mediante implantação de barragens de maiores alturas, neste caso, a barragem, vertedouro, tomada d'água e casa de força encontram-se solidários, ocupando todo o leito do rio. A queda, assim, é proporcionada pela altura da barragem, que implica na formação de grandes áreas de reservatório onde se concentram os grandes impactos. Já as usinas de desvio que aproveitam o desnível do trecho do curso d'água para gerar o potencial hidráulico, neste caso, a casa de máquinas se localiza afastada da barragem, interligadas pelo circuito hidráulico, que desvia a água do rio de seu leito natural. A queda é proporcionada em maior parte, aproveitando-se a queda natural existente no rio.

Como contraponto à redução do impacto causado pela redução de área, surgem novos impactos associados à formação de um, trecho curto – circuitado compreendido entre a barragem e a casa de força, afetando o próprio leito natural do rio e também a população lindeira que faz uso dessa água, figura 1. Este segundo arranjo é típico para as Pequenas Centrais Hidrelétricas. A manutenção da vazão mínima, neste Trecho de Vazão Reduzida - TVR, vem sendo objeto de muita discussão entre empreendedores e órgãos ambientais, pois a vazão destinada a este percurso, é uma parcela que não estará disponível para a geração.



**Figura 1 – Arranjo típico de uma central de desvio com Trecho de Vazão Reduzida**

Deve ser observado, que o empreendimento faz a captação de água na barragem, e restitui a jusante da casa de força, neste caso, a disponibilidade hídrica, se refere ao montante de água reservado para o aproveitamento como um todo, da mesma maneira como ocorre para a indústria, por exemplo. Ao ser considerado o TVR, como uma estrutura isolada, contrapõe a viabilidade econômica do empreendimento.

Na legislação brasileira, não há uma abordagem específica para o tema, fato esse, que pode ser justificado, devido as particularidades de cada caso, assim, a padronização de vazões mínimas para esses trechos, poderiam acarretar equívocos.

No entanto, a Vazão Remanescente - $Q_r$ , que é a vazão mínima a ser mantida no leito do rio no trecho desviado, vêm sendo motivo de muita discussão nos dias atuais. Em verdade, há muito já se estabeleciam valores de referência para esse caudal, sendo, entretanto, os mesmos carentes de maiores justificativas científicas.

Devido à peculiaridade de cada caso envolvido, e a abrangência dos aspectos, a proposta deste trabalho seria, a aplicação de técnicas multicriteriais, como auxílio a tomada de decisão. Segundo Zuffo et al (2002), a

necessidade de se analisar aspectos ambientais e sociais de difícil inserção e comparação com aspectos técnicos e econômicos vem apresentando bons resultados com a aplicação de métodos multicriteriais como auxílio a tomada de decisão. Neste trabalho, foram abordados 9 critérios e 11 diferentes alternativas para aplicação da Programação por Compromisso (CP).

## ESTUDO DE CASO

Esta parte do trabalho apresenta, um entrave encontrado no licenciamento ambiental de uma PCH no estado de São Paulo, referente a o trecho de vazão reduzida. Neste caso, o intervalo entre a barragem e a casa de força é de 3,2 Km. Neste segmento o rio corre sobre o leito rochoso com formação de corredeiras num declive de aproximadamente 68 metros desde o local do eixo do barramento até o local da restituição da casa de força.

Vale ressaltar que a vazão mínima (vazão residual) a ser garantida a partir da instalação de dispositivo no corpo do barramento, se somará as contribuições provenientes de pequenos córregos existentes em ambas as margens neste trecho do rio. As principais vazões características, do local, estão apresentadas na tabela 1.

**Tabela 1 – Vazões características do local**

VAZÕES (m <sup>3</sup> /s)	
Média de Longo Termo (Q <sub>mlt</sub> )	8,18
Vazão Q <sub>95</sub>	3,80
Vazão Q <sub>90</sub>	4,22
Vazão Q <sub>7,10</sub>	3,12

A tabela 2 apresenta as vazões media mensais para a região em estudo. Os obtidos apresentados abaixo, foram obtidos da estação Estrada do Cunha (5803000) localizada no rio Paraitinga.

**Tabela 2 – Vazões Média Mensal**

Mês	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
<b>Máxima</b>	29,36	36,46	29,03	18,23	13,35	18,1	10,94	8,79	16,41	13,87	17,19	19,73
<b>Minima</b>	4,28	4,58	4,91	4,35	3,88	3,44	2,97	2,86	2,55	2,68	3,36	4,49
<b>Média</b>	11,62	13,08	12,5	9,3	7,41	6,55	5,76	5,19	5,26	5,79	6,73	8,96

Conforme trabalho desenvolvido no local, verificou-se que as terras lindeiras, ao trecho de vazão reduzida estão voltadas para uso agrícola ou com cobertura de vegetação arbórea (ciliar), sendo que 65,50% das terras são destinadas a pastagens, e 34,5 % tem cobertura de vegetação ciliar. Também ficou apurado que 80 % das propriedades rurais utilizavam o rio Paraitinga para a dessedentação do rebanho.

Os estudos energéticos para dimensionamento da PCH elaborados no projeto básico aprovados pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, resultaram em uma potência instalada de 7 MW, conforme tabela 3.

**Tabela 3 - Dados da Produção de Energia – Projeto Básico**

Grandeza	Unidade	Valor
NA máximo.normal montante	M	907
NA jusante médio	M	824
Queda Bruta	M	83
Perda de Carga Média	%	5
Queda Líquida	M	78,85
Vazão Máxima Turbinada	m <sup>3</sup> /s	10,1
Rendimento Médio da Turbina	%	92
Rendimento Médio do Gerador	%	97
Área do reservatório	Há	22,2
Área de drenagem	Km <sup>2</sup>	480

Neste projeto, a vazão mínima no trecho de vazão entre a barragem e a casa de força era de 0,20 m<sup>3</sup>/s, no entanto o Departamento de Avaliação de Impacto Ambiental – DAIA do Estado de São Paulo, ao expedir a licença prévia, limitou a vazão mínima a ser garantida no trecho com a Q<sub>7,10</sub>, que neste caso equivale a 3,12 m<sup>3</sup>/s. Em busca de uma maior flexibilização para o tratamento dessa questão, o empreendedor propôs ao DAIA o aumento no TVR para 500 l/s (0,50 m<sup>3</sup>/s).

Deve ser ressaltado que a vazão mínima de 500 l/s representa 19,38% da vazão mínima média mensal do rio Paraitinga para esse trecho, sendo que nos meses úmidos (janeiro, fevereiro e março), esta vazão será incrementada pelos vertimentos decorrentes das vazões afluentes acima da capacidade de turbinamento.

Considerando que seja mantido a mesma potência instalada de 7 MW, com duas unidades geradoras pode ser observado que a perda de energia será considerável, passando de 4,73 MW<sub>med</sub> para 3,04 MW<sub>med</sub> quando a vazão no TVR, passa de 0,5 m<sup>3</sup>/s para 3,12 m<sup>3</sup>/s representando uma perda de energia de aproximadamente 36%. Analisando que a usina terá o mesmo custo de instalação previsto no projeto básico, tendo em vista que os custos com obras civis (barragem, canal de adução, conduto forçado, e casa de força) e equipamentos eletromecânicos não se alteram, um empreendimento desta natureza não se viabilizaria após uma redução na sua receita deste porte.

### MÉTODO DE PROGRAMAÇÃO DE COMPROMISSO

No caso em estudo, quando se observa a ótica dos órgãos ambientais, que faz análise de variáveis qualitativas e portanto não quantificáveis com facilidade, pode ser verificado segundo Lucena (2003), que os modelos de avaliação multicriteriais, podem ser adequados à análise de projetos que incluam os critérios ambientais, sejam eles projetos sociais, de transporte, entre outros.

O método da Programação de Compromisso é um dos métodos baseados na programação multiobjetiva e foi adotado por estar baseado no conceito de distância métrica (Teorema de Pitágoras), entre dois pontos cujas coordenadas são conhecidas Zeleny, 1982 citado Zuffo et al (2002). Segundo o autor, o que motiva a utilização deste método é que ele procura minimizar a distância de todos os pontos factíveis avaliáveis, para um determinado ponto escolhido pelo tomador de decisão (DM – Decision Maker), chamado de “Ponto Ideal”. A dificuldade na escolha do “Ponto Ideal” em relação a solução final é diminuída quando, por uma restrição, o “Ponto Meta” for menor ou igual ao “Ponto Ideal”, como ilustrado na figura 2. Uma “Solução Ideal” é definida pela função objetivo  $f_i^* = \text{Max } f_i(x)$ . O vetor  $f^*$  cujos elementos são todos máximos é chamado de vetor ideal:  $f^* = (f_1^*, f_2^*, \dots, f_n^*)$ .

A obtenção da solução Ideal não é possível pois dificilmente existe um vetor de decisões  $x^*$  que seja solução comum a todos os  $n$  problemas. Porém, ela pode ser utilizada na avaliação das soluções alcançáveis. Esta distância é medida pela família métrica “ $l_s$ ”, definida por:

$$l_s = \left( \sum_{i=1}^n \alpha_i^s \left| \frac{f_i^* - f_i(x)}{f_i^* - f_{i,w}} \right|^s \right)^{\frac{1}{s}} \quad \text{Equação 1}$$

em que:  $\alpha_i$  são pesos atribuídos subjetivamente pelo DM ou derivado de alguma estrutura de preferência;  $f_{i,w}$  é o pior valor obtido para o critério  $i$ ;  $f_i(x)$  é o resultado da implementação da decisão  $x$  com respeito ao  $i$ ésimo critério;  $S$  reflete a importância que o DM atribui aos desvios máximos, e varia no seguinte intervalo:  $1 < S < \infty$ .

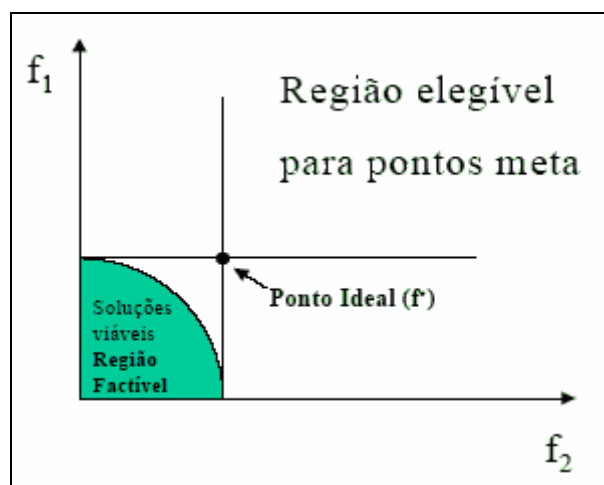


Figura 2 – Seleção do ponto Meta  
Fonte: Zuffo (1998)

Para  $S = 1$ , todos os desvios de  $f_i^*$  são levados em consideração proporcionalmente às suas magnitudes. Para  $2 < S < \infty$ , o maior desvio tem a maior influência. Para  $S = \infty$ , o maior desvio é o único

considerado (critério minimax). O problema é resolvido, geralmente, para um conjunto de pesos atribuídos  $\{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n\}$  e para  $S=1, 2$  e  $\infty$  (Gershon e Duckstein, 1983), citado por Zuffo et al (2002).

Como a escolha de “S” reflete a importância que o DM atribui aos desvios máximos, pode-se dizer que existe dois esquemas de pesos: no primeiro o parâmetro “S” reflete a importância que os desvios máximos possuem e, no segundo o parâmetro “ $\alpha_i$ ” reflete a importância do critério  $i$ .

Segundo Zuffo (1998), quando as alternativas de solução estão discretizadas e cada um dos critérios está representado na matriz de avaliação (Payoff), este método pode ser aplicado fazendo-se que os melhores valores alcançados por cada um dos critérios seja definido como  $f_i^*$ , e os piores como  $f_{i,w}$ . Com esses valores, com os parâmetros “ $\alpha_i$ ” (pesos) e “S” dados, calcula-se a distância de cada alternativa à solução ideal, e seleciona-se a alternativa de menor distância como a de melhor compromisso.

### MÉTODO DE TEORIA DOS JOGOS - CGT

A Teoria dos Jogos Cooperativos, ao invés de se minimizar a distância de um certo ponto ideal, a “melhor” solução é aquela que maximiza de algum ponto “*status quo*” de nível mínimo, em que a medida utilizada é a geométrica, (Gershon e Duckstein, 1983), citado por Zuffo et al (2002).

A teoria dos jogos, em geral, é um estudo matemático de resolução de conflitos. O resultado de cada acordo resulta na formulação de uma matriz de avaliação (payoff). A função de distância é dada por:

$$l_s(x) = \prod_{i=1}^n |f_i(x) - f_i^*|^{\alpha_i} \quad \text{Equação 2}$$

em que:  $\alpha_i$  é o peso do  $i$ ésimo critério;  $f_i^*$  o  $i$ ésimo elemento do ponto *status quo* e  $f_i(x)$  é o resultado da implementação da decisão  $x$  com respeito ao  $i$ ésimo critério.

Segundo Zuffo (2002), o que torna a técnica interessante é que ela evidencia que a única solução existente é obtida através de um único caminho, para que o problema possa ser visto como multiobjetivo.

### INDICADORES DE VAZÃO MÍNIMA

Vários são os estudos que sugerem a vazão mínima que deve ser mantida no curso d’água que atendam as necessidades ecológicas e sanitária do ecossistema em diagnóstico. Assim, para que se possa estimar a solução ideal para o caso em estudo, foi realizada uma revisão metodológica de diversas técnicas estudadas no Brasil e exterior, mas com aplicabilidade a qualquer curso d’água do mundo inteiro, conforme será apresentado a seguir.

O método Montana (Tennant), é um dos modelos hidrológicos mais utilizados nos EUA, sendo desenvolvido por Tennant em 1976 no “United States Fish and Wildlife Service” - USFWS. Esse método recomenda vazões mínimas garantidas para espécies aquáticas relacionados, em função de percentagens de vazão média anual divididas em categorias que variam de acordo com as condições gerais de qualidade do habitat. O método também recomenda vazões máximas periódicas para possibilitar o transporte de sedimentos do leito do rio. A vazão média anual e o perímetro molhado, que forma a base conceitual dessa metodologia, foram desenvolvidos por meio de estudos de campo conduzidos em rios, nos estados americanos de Montana, Wyoming e Nebraska em um período de dez anos. Esse estudo intensivo revelou que a condição do habitat aquático era notavelmente similar na maioria dos rios estudados que portavam a mesma porção de vazão média anual. Essa correlação foi, posteriormente, verificada por vários outros estudos em rios de 21 estados por um período de 17 anos (Tharme, 1996).

Em seu texto, Tennant (1976), diz que a aplicação desse método envolve as seguintes etapas:

- Determinação da vazão média anual da bacia hidrográfica no local de interesse. No caso em estudo, esta vazão equivale a 8,18 m<sup>3</sup>/s, conforme apresentado na tabela 1.
- Estudo do corpo d’água quando a vazão no mesmo for aproximadamente, 10%, 30% e 60% da vazão média anual.

Como resultado dessas medidas, Tennant concluiu que 10% da vazão média anual seria a vazão mínima instantânea necessária para manter o habitat saudável, por um curto período de tempo, constituindo – se nas condições de habitat necessárias à sobrevivência da maior parte das espécies aquáticas.

Para uma vazão de 30% da vazão média anual, o habitat mantém condições boas para a vida aquática dos rios estudados, as larguras, profundidades e velocidades são geralmente, satisfatórias, e parte significativa do leito se mantém coberta e os peixes maiores não tem mais problemas para circulação.

Já para 60% da vazão média anual, é mantida condição excelente do habitat, formas de vida aquática e para a maioria dos usos recreativos. Esse método tem a virtude de necessitar somente de dados de vazões

médias anuais para a sua aplicação. Contudo, é sujeito a muita subjetividade a sua aplicação. Na tabela 4, são apresentadas as vazões de referência, para o método em estudo.

**Tabela 4 – Vazões utilizadas no método de Montana**

% de $Q_{mlt}$	Valor ( $m^3/s$ )
10	0,82
30	2,46
60	4,92

O procedimento da Nova Inglaterra ou da Vazão Básica – ABF, é um método hidrológico desenvolvido pelo USFW em 1981 que surgiu a partir do método de Montana. De acordo com as citações feitas por Cassie e El-Jabi (1995), o ABF tem como hipótese básica, que a mediana das vazões mensais ( $Q_{50}$ ), para o mês mais seco, é suficiente para a proteção da biota aquática. Para o caso em estudo, este valor equivale a 50% da vazão média mensal para o mês de Agosto, o que equivale a  $2,60 m^3/s$ .

Já Mortari (1997), afirma que a vazão residual deverá satisfazer duas condições primordiais: assegurar a vazão para peixes migratórios e garantir uma renovação de volume de duas vezes por dia para manter as condições de qualidade e oxigenação adequada ao habitat dos peixes. Segundo o autor, estudos realizados para implantação de usinas, afirmam que para serem atendidas essas condicionantes a vazão remanescente correspondente a 30% da vazão mínima média mensal que em nosso caso equivale a  $0,77 m^3/s$ .

O trabalho de Pacca e Fabrizio (1996), mostrou que na França, em 1984 uma lei relativa a pesca em água doce, definiu a vazão não turbinável no trecho curto-circuitado em 10% da vazão total da corredeira, durante todo o ano, quando esta for inferior a  $80 m^3/s$ . Para vazões acima deste valor, é fixado em 5%, mas pode ser aumentado pela vontade das autoridades. Além de proteger a fauna aquática, esta exigência procura não comprometer a salubridade pública, pois visa garantir o suprimento d'água a jusante da tomada d'água.

Quando se analisa os critérios que vigoravam no setor elétrico, verificou-se que as Normas 2 e 3 do DNAEE - Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, de 7/07/1997, para Aprovação de Projetos de Geração Hidrelétrica para Uso no Serviço Público e Exclusivo de Particulares, conforme artigo 3.7. previa:

“Na elaboração dos estudos e na concepção do Projeto Básico deverá ser considerado que a vazão remanescente no curso d'água, a jusante do barramento, não poderá ser inferior à 80% da vazão mínima média mensal, caracterizada com base na série histórica de vazões com extensão de, pelo menos, 10 anos....”. o que significa  $2,06 m^3/s$ .

Para o caso de Pequenas Usinas Hidrelétricas a Norma nº 4, Norma de Projetos de Geração de PCH, no Manual de PCH – Eletrobrás/DNAEE. no item 3, subitem 3.9 estipula que na elaboração de estudos e na concepção do projeto, deverá ser considerado que a vazão remanescente no curso d'água, a jusante do barramento, não inferior à vazão mínima média mensal calculada com base nas observações anuais no local previsto para o barramento, significando  $2,58 m^3/s$ .

Já o trabalho de Luz (1995), mostra estudos de cenários no planejamento no uso dos recursos hídricos embasado nos critérios de outorga estadual, considerando 20% de  $Q_{7,10}$  como sendo a vazão remanescente a ser mantida nos leitos dos rios. Assim, esse percentual representaria  $0,62 m^3/s$ .

Ao ser analisado indicadores ambientais, pode ser verificado através da Resolução 20/86 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, por exemplo, que estabelece nove classes de qualidade para águas doce, salobra e salinas, segundo sua destinação, definindo valores toleráveis de alguns parâmetros físico-químicos, (como exemplo: coliformes, cor, turbidez, demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e oxigênio dissolvido (OD)) e considera que a condição crítica de vazão para estudos sobre a capacidade de autodepuração dos corpos de água o  $Q_{7,10}$  que conforme foi apresentado na tabela 1 representa  $3,12 m^3/s$ .

O Método das vazões anuais mínimas de 7 dias, é um método hidrológico que vem tendo muita aplicabilidade na Inglaterra, neste caso a vazão de referência é a mínima das médias móveis das vazões diárias com janelas de 7 dias ao longo de cada ano hidrológico, sendo o valor adotado como referência, a média de todos os valores mínimos para toda a série histórica, diferentemente do  $Q_{7,10}$  esse método não associa essas vazões a um determinado tempo de retorno. Habitualmente, adota-se percentual outorgável, como sendo 50% desse valor, que nesse caso equivale a  $0,92 m^3/s$ .

Uma última opção que pode ser adotado no caso de não haver dados da série histórica de vazões, Larson apud Benetti et al., (2002), determinaram na Nova Inglaterra, EUA as vazões residuais em função da área de drenagem da bacia hidrográfica, chegando a um valor de  $5,5 l/s.Km^2$  de área de drenagem. Conforme apresentado na tabela 3, para uma área de drenagem de  $480 Km^2$ , essa vazão representaria aproximadamente  $2,64 m^3/s$ . O quadro abaixo apresenta todas as alternativas que estão sendo utilizadas para o caso em estudo.

**Tabela 5 - Alternativas**

Luz	Mortari	Montana 10%	Q <sub>7</sub>	DNAEE	Montana 30%	Eletrobrás	ABF	Benetti	Conama	Montana 60%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0.62	0.77	0.82	0.92	2.06	2.46	2.58	2.6	2.64	3.62	4.92

### CRITÉRIOS

Para aplicação dos métodos multicriteriais foram escolhidos critérios, tabela 6 que abordassem distintos objetivos como: econômicos, ambientais, sociais e técnicos com intuito de se obter a maior abrangência possível. No entanto, para esse estudo, foi considerado a influência desses critérios apenas no TVR. Uma análise mais profunda mostra, que o único critério que se beneficia da redução de vazão no trecho é o energético, no entanto deve ser lembrado que seu benefício extrapola em muito, seu porte ou sua microrregião.

**Tabela 6 – Aspectos abordados**

Impacto Ambiental	Impacto Social	Paisagístico	Sistema de Transposição	Usos da água	Qualidade da Água	Desse-detecção	Aspecto Legal	Produção de Energia
-------------------	----------------	--------------	-------------------------	--------------	-------------------	----------------	---------------	---------------------

O impacto ambiental foi considerado, levando-se em consideração que a implantação do empreendimento, vai acarretar modificações no meio ambiente. Observa-se, que tanto no reservatório como no TVR, o ímpeto da obra, terão abrangência pequena, isto ocorre devido a topografia do terreno, onde a variação da lâmina não representa impacto significativo, deve ser lembrado, que os impactos causados são na sua maioria, perfeitamente mitigáveis ou compensáveis.

Já o impacto social, tem por função analisar a consequência do deslocamento de pessoas (no caso em estudo não haverá) e mudanças nas atividades econômicas e de recreação no TVR. Deve ser enfatizado, que tanto esse como os demais aspectos, que estão sendo analisados, se referem aos efeitos da manutenção da água no trecho – curto circuitado entre a barragem e a casa de força. As atividades de recreação e turismo, para esse caso específico, são pouco exploradas, devido as dificuldades de acesso ao local enquanto o aspecto paisagístico representa o ímpeto visual que é causado pela variação do nível de água.

A manutenção de água que deverá ser mantida no trecho, onde será instalado o Sistema de Transposição de peixes, - STP's é um item muito importante, pois a implantação dessa estrutura é prática obrigatória em alguns estados brasileiros como São Paulo e Minas Gerais, devendo com intuito de se atenuar os efeitos negativos dos barramentos sobre os peixes migradores ou de piracema. No Brasil, como na maioria dos países subdesenvolvidos, devido a fatores históricos, financeiros, políticos, constitucionais e culturais desfavoráveis, há uma defasagem tecnológica quanto a implementação desses Sistemas.

Dentre as alternativas estudadas por Martins e Kamada (2000) na Universidade Estadual de São Paulo, existem 5 tipos de escadas para os STP's conforme mostra a tabela 7.

**Tabela 7 - Resumo comparativo entre as alternativas**

Opção	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Área Média (m <sup>2</sup> )	Lâmina D'água (m)	Velocidade máxima (m/s)	Fr
1	0,7	0,525	1,00	1,80	0,9
2	2,58	1,560	1,00	2,00	0,9
3	2,77	0,800	1,00	2,70	0,9
4	3,18	1,600	1,00	3,10	1,0
5	0,76	0,800	1,00	2,60	0,8

Os principais usos humanos da água para a região em estudo, são para a irrigação de pequenas áreas, aproximadamente 5 ha sendo que a população ribeirinha não faz captação de água no rio, objetivando o consumo. Já para dessedentação animal, cujo consumo de água *percapita/dia* para os bovinos (única espécie que utiliza parcela considerável de água) é de 40 l, é esperado que a água remanescente deverá ser suficiente para atender as 160 cabeças, conforme levantamento realizado em dezembro de 2002.

Os resultados das análises físico, química e bacteriológica das águas para o trecho do rio de Paraitinga no qual estará inserido o empreendimento, indicaram que o Índice de Qualidade das Água - IQA é bem satisfatório, estando as águas neste trecho classificadas como de Qualidade Boa, para os três pontos de coletas (a montante do futuro reservatório, próximo do eixo do barramento e a jusante do local da futura casa de força). Os estudos liminológicos mostraram que as águas do TVR são de boa qualidade, pouco mineralizadas, pobres em nutrientes, fósforos, nitrogênio e materiais orgânicos de rápida decomposição, bem como ricas em oxigênio. Os índices bacteriológicos atingiram níveis plenamente satisfatórios no sentido de

água de boa qualidade. Os estudos concluíram que durante todo o tempo de operação da PCH, mesmo para o trecho de vazão reduzida, os níveis de qualidade das águas deverão ser plenamente satisfatórios.

A geração de energia é o critério que mais sofre com a variação de água no trecho. Conforme mencionado anteriormente, a água destinada ao trecho, é percentual que não será utilizado para produção de energia. Assim, quanto maior a vazão no trecho, menor será a rentabilidade do empreendimento, podendo acarretar a inviabilidade da obra.

O último critério escolhido partiu do conhecimento dos autores, que os órgãos outorgantes, partem do princípio que o empreendimento será outorgado conforme os preceitos legais, considerando o TVR como uma estrutura isolada cuja vazão remanescente será consuntiva. Essa prática, vem se aplicando com frequência, no entanto de maneira equivocada, pois a quantidade que permanece no trecho, retoma seu leito normal, a jusante da casa de força. No estado de São Paulo, a Lei nº 9.034, de 27 de dezembro de 1994 (Art. 13, I) implementa a vazão de referência, para orientar a outorga de direitos de uso de recursos hídricos, com base no  $Q_{7,10}$ , determinando que o somatório das vazões captadas não deve superar 50% (cinquenta por cento) da respectiva vazão de referência conforme artigo 14 da mesma lei. No entanto deve ser enfatizado, que ainda não vigora nenhuma lei específica que aborde o critério em estudo.

### APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Para a definição dos pesos relativos a cada um dos critérios elaborados, os autores realizaram uma consulta a profissionais ligadas aos Recursos Hídricos e Meio Ambiente, com objetivo de estabelecer de forma isenta, o grau de importância relativa que os critérios teriam em relação aos demais, para o caso específico do TVR. A escala de valores dos pesos encontram-se em uma faixa compreendida entre os valores de 1 a 10, conforme tabela abaixo.

**Tabela 8 – Pesos dos aspectos abordados**

Impacto Ambiental	Impacto Social	Paisagístico	Sistema de Transposição	Usos da água	Qualidade da Água	Desse-detecção	Aspecto Legal	Produção de Energia
5	4	9	6	4	5	5	9	9

Para a elaboração da matriz de dados, foram utilizadas funções objetivo, no qual foi avaliado o comportamento de cada critério (escala de valores variando de 0 a 100), em função da variação da vazão, conforme mostra a tabela 9.

**Tabela 9 - Matriz de dados**

Alternativas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>Crítérios</b>	==	==	===	==	==	==	==	==	==	==	==
<b>Impacto Ambiental</b>	40	42	44	45	60	65	68	69	70	72	78
<b>Impacto Social</b>	48	49	50	51	60	64	65	66	66	76	86
<b>Paisagístico</b>	30	31	33	40	50	54	56	57	57	65	75
<b>Sistema de Transposição</b>	0	40	45	50	56	58	60	61	62	85	100
<b>Usos da água</b>	55	57	58	59	70	72	73	74	75	82	85
<b>Qualidade da Água</b>	70	71	72	75	82	85	86	86	86	90	92
<b>Dessedentação animal</b>	80	80	81	82	90	92	92	92	92	94	95
<b>Produção de Energia</b>	95	94	92	90	70	66	65	64	64	50	45
<b>Aspecto Legal</b>	30	32	34	40	80	82	83	83	83	90	92

Após a obtenção da matriz acima, pode ser aplicado a equação 1, com intuito de se obter a menor distância, como sendo a de menor compromisso. Para “S”=1, foi obtido como melhor solução, a metodologia sugerido por Montana, referente manutenção de 60% de  $Q_{mlt}$  no trecho de vazão reduzida. Porém, deve ser verificado que essa alternativa, representa uma perda considerável de energia, podendo inviabilizar a implantação empreendimento, que determinou o estudo de caso. Para o efeito comparativo, repetiu-se o procedimento para “S” = 2 e “S” = 3, conforme apresenta a tabela 10.



**Tabela 10 – Classificação das alternativas segundo a metodologia CP**

S	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	10º	11º
1	11	10	9	8	7	6	5	4	2	4	1
2	9	8	7	10	6	11	5	4	3	2	1
3	9	8	7	6	10	5	11	3	2	1	4

Assim, pode ser verificado que a melhor alternativa para  $S = 1$ , passa a ser a 6ª opção quando  $S$  assume valor 2 7ª quando  $S$  passa a 3. Assim, considerou-se importante a variação dos valores de  $S$ , pois os pesos maiores ganham mais importância, confirmando os estudos elaborados por Jardim e Lanna (2003). Os autores afirmaram ainda que dentre os valores de  $S$  igual a 1, 2 e  $\infty$ , surge com  $S = 2$ , o valor mais adequado, para calcular os desvios máximos para conferir um conceito vetorial ao peso no caso em estudo. Adicionalmente, eles afirmam que o método CP possibilita uma classificação quantificada, com grande poder de discriminação, o que pode ser obtido através do aumento da precisão no processamento do cálculo matemático da proximidade da estrutura do modelo.

Ao se aplicar o CGT, pode ser apurado apenas uma mudança na ordem de classificação em relação a “ $S = 2$ ”, de tal modo que a alternativa 11 ocuparia a 7ª opção e a 6ª opção passaria a ser ocupada pela alternativa 5, mostrando uma grande compatibilidade entre os dois métodos.

Através dos métodos aplicados, pode ser verificado que a melhor solução seria a manutenção de 2,64  $m^3/s$ , no entanto, do ponto de vista do empreendedor, a perda de energia, ainda representa uma parcela que não pode ser desconsiderada. Por outro lado, os estudos efetuados por Luz (1995) e a manutenção do  $Q_7$  representaram as piores opções.

Conforme citado anteriormente, na legislação brasileira, não existe uma regulamentação que determine a vazão que deverá percorrer no TVR. Partindo da suposição que esse fosse o enfoque, os autores consideraram interessante, desconsiderar o critério legal que havia sido suposto e repetir o procedimento considerando 8 alternativas e onze critérios, e obtiveram os seguintes dos.

**Tabela 11 – Classificação das alternativas desconsiderando o aspecto legal**

		1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	10º	11º
CP	S = 1	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
	S = 2	9	8	7	6	10	5	11	4	3	2	1
	S = 3	9	7	8	6	5	10	11	4	3	2	1
CGT		9	8	7	10	6	11	5	4	3	2	1

Os resultados acima mostraram que com a exclusão de algum critério, não houve mudança significativa dos resultados, no entanto novamente a aplicação da programação por compromisso (CP) utilizando “ $S = 2$ ” e a teoria dos jogos cooperativos (CGT) apresentaram resultados bem aproximados.

Assim, para este caso pode ser concluído após a aplicação de alguns métodos multicriteriais, que a vazão remanescente no trecho de vazão reduzida corresponde a 2,64  $m^3/s$ , equivale a 80% da vazão  $Q_{7,10}$ .

## CONCLUSÕES

A implantação de uma PCH é bastante emblemática, dentro da questão da expansão das fontes alternativas no país. A combinação de fatores ecológicos, técnicos e econômicos é essencial para se encontrar um ponto de equilíbrio.

Neste momento, a aplicação de métodos multicriteriais pode ser uma solução para que se pondere interesses tão distintos. Assim, o emprego dessa ferramenta pode ser um instrumento a ser utilizado por comitês de bacias e órgãos gestores que constantemente lidam com problemas análogos e que buscam o desenvolvimento sustentável.

Neste trabalho, foram empregado o método de Programação por Compromisso (CP) e a o Método da Teoria dos Jogos Cooperativos (CGT), apresentando resultados aproximados, sendo de grande auxílio na técnica de tomada de decisão. Com essas metodologias, verificou -se que a adoção dos pesos dos critérios e das funções de valores é base para a estruturação de todos os problemas.

Contudo, pode ser visto que para o caso específico deste empreendimento, a manutenção de um valor fixo exigido pelo órgão ambiental e carente de maiores justificativas científicas, pode não extinguir os impactos ambientais existentes, entretanto as perdas de energia com a adoção de critérios equivocados, são significativas do ponto de vista energético e podem conduzir a inviabilidade de instalação. Deve-se ressaltar, que a adoção de percentuais de vazões de referência, como  $Q_{7,10}$ ,  $Q_{90}$ ,  $Q_{95}$ , é meramente um valor comparativo, já que os impactos ambientais no trecho de vazão reduzida é uma função dos usos da água e tem que ser avaliados caso a caso. O ideal seria que se fizesse dentro do possível considerando cenários

atuais e projeções futuras uma análise criteriosa de cada situação, podendo assim constituir um melhor indicador da vazão remanescente. Projetos hidrelétricos baseados em derivações de vazões deveriam sempre considerar primeiramente os usos da água no TVR para em seguida estabelecer o limite mínimo da vazão.

## **BIBLIOGRAFIA**

- BENETTI, A. D.; LANNA, A. E.; COBALCHINI, M. S. (2002). *Metodologias para Determinação de Vazões Ecológicas em Rios*. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Volume 8, n2, p.149-160.
- CASSIE, D. E EL-JABI, N. (1995). *Comparison and regionalization of hydrologically based instream flow techniques in Atlantic Canada*. Canadian Journal of Civil Engineering.
- JARDIM, S.B.; LANNA, A.E.L (2003). *Aplicação de algumas técnicas de Análise Multiobjetivo ao processo Decisório no Âmbito dos Comitês de Gerenciamento de Bacia Hidrográfica*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH, Volume 8 n.4 Out/Dez 2003, 169-191.
- LUCENA, L. F.L. (2003). *A Análise Multicriterial na Avaliação de Impactos Ambientais*. Anais do V Encontro de Economia Ecológica, Campinas, SP.
- LUZ, L.D. (1995). *O estabelecimento de cenários no planejamento dos usos dos recursos hídricos*. Anais do XI Simpósio da Associação Brasileira dos Recursos Hídricos, Recife – PE. V 3.
- MARTINS, S. L. E TAMADA, K (2000). *Sistemas Para a Transposição de Peixes*. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, BT/PHD/72, 30p.
- PACCA, S. A.; FABRIZY, M.P.(1996). *O licenciamento ambiental de Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCH; uma comparação entre o Brasil e a Europa*. VII Congresso Brasileiro de Energia – CBE, VII, pg 684 – 693.RJ.
- SANTOS, A. H. M; RIBEIRO JUNIOR, L.U.; GARCIA, M.A.R.A; SEVERI, M.A. (2003) *Vazão remanescente no trecho de vazão reduzida de pequenas centrais hidrelétricas*. Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Curitiba, PR.
- TENNANT, D. L. (1976). *Instream Flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources*. Fisheries, (1) 4, 6-10.
- THARME, R. (1996). *Review of International Methodologies for the Quantification of the Instream Flow Requirements of Rivers*. Department of Water Affairs and Forestry, Cape Town, África do Sul.
- ZUFFO, A. C.; REIS, L. F.R.; SANTOS, R.F.; CLAUDHRY, F.H. (2002). *Aplicação de Métodos Multicriteriais ao Planejamento de Recursos Hídricos*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos – Volume 7 n.1 Jan/Mar 2002, 81-102.
- ZUFFO, A.C. (1998). *Seleção e aplicação de métodos multicriteriais ao planejamento ambiental de recursos hídricos*. Tese de doutorado, apresentado a Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 1998.