
**SISTEMA DE INVENTÁRIO HIDROELÉTRICO DE BACIAS
HIDROGRÁFICAS**

SINV

Versão 6.2

MANUAL DE METODOLOGIA

Dezembro 2016

SUMÁRIO

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1. | INTRODUÇÃO | 5 |
| 2. | CONCEITOS BÁSICOS | 6 |
| 2.1 | Conjunto de locais barráveis..... | 6 |
| 2.2 | Conjunto de projetos | 6 |
| 2.3 | Projetos de derivação | 7 |
| 2.4 | Alternativa de divisão de queda..... | 7 |
| 2.5 | Uso múltiplo d'água | 7 |
| 2.6 | Conceitos de natureza energética | 8 |
| 2.6.1 | Sistema de Referência | 8 |
| 2.6.2 | Período Crítico | 9 |
| 2.6.3 | Benefícios Energéticos para Fins de Inventário | 9 |
| 2.6.4 | Dimensionamento Energético..... | 10 |
| 2.6.5 | Custos de Referência | 14 |
| 2.6.6 | Índices Custo/Benefício Energético | 14 |
| 2.6.7 | Competitividade Econômica-Energética | 16 |
| 2.6.8 | Custos Incrementais..... | 17 |
| 2.6.9 | Ordem Econômica de Construção de uma Alternativa | 17 |
| 2.7 | Conceitos de natureza ambiental..... | 17 |
| 2.7.1 | Sistema Ambiental | 17 |
| 2.7.2 | Componentes-síntese | 18 |
| 2.7.3 | Subáreas | 18 |
| 2.7.4 | Impacto Socioambiental Negativo | 19 |
| 2.7.5 | Impacto Socioambiental Positivo | 19 |
| 2.7.6 | Indicador de Impacto/Critério de Avaliação/ Elementos de Avaliação | 20 |
| 2.7.7 | Índices Socioambientais..... | 20 |
| 2.7.8 | Avaliação de Impactos de Aproveitamentos sobre um Componente-síntese | 20 |
| 2.7.9 | Avaliação de Impacto Socioambiental da Alternativa..... | 22 |
| 2.7.10 | Consideração do impacto referente a complementação energética das Alternativas...28 | |
| 2.8 | Critérios para escolha de alternativa | 30 |
| 2.8.1 | Estudos Preliminares | 30 |
| 2.8.2 | Estudos Finais..... | 30 |
| 3. | FUNÇÕES EXECUTADAS PELO SINV | 32 |
| 3.1 | Geração de alternativas | 33 |
| 3.2 | Energia firme..... | 34 |
| 3.2.1 | Cálculo Simplificado..... | 35 |

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 3.2.2 | Cálculo por Simulação..... | 39 |
| 3.3 | Otimização volume útil | 47 |
| 3.4 | Dimensionamento energético | 48 |
| 3.5 | Verificação reenchimento volume útil..... | 50 |
| 3.6 | Elimina | 52 |
| 3.7 | Avaliação econômica energética..... | 52 |
| 3.8 | Ordena..... | 52 |
| 3.9 | Cálculo período crítico | 54 |
| 3.10 | Cálculo impacto socioambiental negativo | 55 |
| 3.11 | Cálculo impacto socioambiental positivo | 55 |
| 3.12 | Análise multiobjetivo preliminar..... | 56 |
| 3.13 | Análise multiobjetivo final | 57 |
| 4. | BIBLIOGRAFIA | 59 |

1. INTRODUÇÃO

O Sistema de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas (SINV) tem como objetivo automatizar os métodos descritos na revisão de 2007 do Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacia Hidrográfica (MME, 2007) para execução dos estudos energéticos e ambientais e para a comparação e seleção de alternativas de divisão de queda dentro de uma abordagem multiobjetivo, tendo como critérios a maximização da eficiência econômico-energética em conjunto com a minimização dos impactos socioambientais negativos, levando em consideração os impactos socioambientais positivos.

Em relação aos estudos energéticos, o sistema SINV 6.2 possui facilidades para dimensionamento energético de projetos, análise de viabilidade econômico-energética de projetos, avaliação econômico-energética de alternativas de divisão de queda e definição da ordem de prioridades para a construção dos projetos de uma alternativa segundo o critério econômico-energético. Em relação aos estudos socioambientais, o sistema SINV 6.2 possui facilidades para: a definição de componentes-síntese e dos aspectos socioeconômicos a serem considerados na avaliação dos impactos positivos; para a divisão espacial (subáreas) correlata; para o armazenamento e edição dos índices de impacto socioambiental negativo causados pelos projetos em cada subárea; armazenamento de dados para o cálculo dos impactos socioambientais positivos; e obtenção dos índices de impacto socioambiental negativo e positivo das alternativas de divisão de queda.

Em relação à comparação e seleção de alternativas, o sistema SINV 6.2 possui facilidades para escolha do conjunto de alternativas que devem passar da fase de Estudos Preliminares para a fase de Estudos Finais e hierarquização de alternativas, conforme peso relativo dos objetivos, ao final dos Estudos.

A documentação do sistema é composta por dois Manuais. O Manual de Metodologia apresenta os conceitos básicos e o detalhamento metodológico das funções implementadas no sistema. O Manual de Utilização descreve as principais características do sistema, assim como a sua utilização.

2. CONCEITOS BÁSICOS

Ao se programar a utilização dos módulos do sistema SINV deve-se ter em conta alguns conceitos básicos.

2.1 CONJUNTO DE LOCAIS BARRÁVEIS

Nas fases iniciais do Estudo de Inventário Hidroelétrico de uma bacia hidrográfica são identificados os pontos da rede de drenagem onde seja conveniente a instalação de um aproveitamento hidroelétrico ou onde já exista um aproveitamento. Estes pontos são chamados de locais barráveis. O conjunto de locais barráveis e as suas inter-relações montante-jusante formam a topologia do estudo. A cada local barrável da topologia do estudo associa-se o nome do rio no qual ele se situa, um conjunto de curvas cota x volume x área, uma vazão mínima considerada ali necessária para manutenção da qualidade da água e/ou tirantes para navegação, um posto fluviométrico, uma estação evaporimétrica e dois postos hipotéticos fornecendo medidas mensais de total de retiradas líquidas de água à montante; um específico para as retiradas por irrigação e outro agregando todos os outros usos d'água.

2.2 CONJUNTO DE PROJETOS

O Conjunto de Projetos de um Estudo de Inventário Hidroelétrico é a relação de todos os aproveitamentos localizados na bacia em estudo. Note que é possível a ocorrência de vários projetos num mesmo local barrável.

O Conjunto de Projetos armazena informações fornecidas pelo usuário referentes a cada projeto, tais como: identificação, localização topológica (local barrável), curva-chave do canal de fuga, características energéticas (limites de operação dos níveis de montante e características do conjunto turbina-gerador), e custos de implantação e de operação e manutenção.

Um projeto pode ser definido como existente ou planejado. No caso de projeto existente, as características energéticas estão fixadas e o custo de implantação deve ser nulo. No caso de projeto planejado, as características energéticas são definidas no processo de dimensionamento (item 2.6.4) e o custo de implantação é obtido do orçamento do projeto já dimensionado.

Os projetos são também classificados em projetos à fio d'água e projetos com regularização. No primeiro caso, os níveis máximo e mínimo de operação do projeto devem ser iguais. Em projeto com regularização o nível mínimo de operação pode estar limitado a um limite inferior definido tendo em vista o uso múltiplo d'água (item 2.5).

2.3 PROJETOS DE DERIVAÇÃO

É possível representar projetos de derivação onde o local barrável imediatamente a jusante da casa de força difere do local barrável que, na topologia natural, encontra-se imediatamente a jusante do local do projeto. Considera-se que continuam a fluir pela topologia natural as defluências de manutenção da vazão mínima associada ao local barrável e os vertimentos. Os turbinamentos serão defluídos pela derivação.

2.4 ALTERNATIVA DE DIVISÃO DE QUEDA

Uma Alternativa de Divisão de Queda é um subconjunto do Conjunto de Projetos composto por aproveitamentos não excludentes. Ou seja, os projetos de uma Alternativa de Divisão de Queda devem sempre ocupar locais barráveis distintos e o nível máximo de um projeto não pode ser superior aos níveis máximos dos projetos à montante. No sistema SINV existem 7 conjuntos de alternativas agrupados em duas classes; a classe dos conjuntos de alternativas referentes à fase de Estudos Preliminares e a classe dos conjuntos referentes aos Estudos Finais. Na classe de Estudos Preliminares existem os conjuntos de alternativas Originais, alternativas Modificadas e alternativas Otimizadas. O primeiro conjunto contém todas as alternativas criadas pelo usuário na sua forma original. O segundo conjunto contém as alternativas obtidas por modificações de alternativas originais, e o terceiro conjunto contém alternativas oriundas dos dois conjuntos anteriores através da eliminação de aproveitamentos não competitivos segundo os critérios econômico-energéticos (ver item 2.6.7). Na classe de Estudos Finais existe, além dos conjuntos Originais, Modificadas e Otimizadas, o conjunto das Alternativas Hierarquizadas. O conjunto Originais Finais contém todas as alternativas selecionadas nos Estudos Preliminares para passarem para Estudos Finais (ver item 2.8.1). Os conjuntos Modificadas Finais e Otimizadas Finais têm a mesma conotação que os análogos da classe Preliminar. O conjunto Hierarquizadas Finais contém as alternativas do conjunto Otimizadas Finais só que ordenadas segundo o índice de preferência (ver item 2.8.2).

2.5 USO MÚLTIPLO D'ÁGUA

Embora os estudos de Inventário Hidroelétrico não se proponham explicitamente a atingir a utilização ótima dos recursos hídricos da bacia estudada, nos Estudos Finais, na composição e avaliação das diversas alternativas de divisão de queda devem ser obrigatoriamente considerados os usos múltiplos da água e sua interação com a proposta de aproveitamento energético.

Visando avaliar se haverá necessidade de considerar o cenário de usos múltiplos já na fase de Estudos Preliminares, deve-se identificar se na bacia em estudo os usos múltiplos da água sugerem a alteração significativa na definição e/ou na avaliação das alternativas de divisão de queda (MME,

2007). Esta identificação é feita na etapa do Diagnóstico dos usos múltiplos da água. Se a bacia em estudo apresentar algum uso muito importante para a definição e comparação das alternativas, o cenário de usos múltiplos poderá ser considerado já nos Estudos Preliminares. Salienta-se que a formulação para os Estudos Preliminares (item 3.2.1) considera o caso mais complexo, onde os usos múltiplos são considerados, a simplificação é automática.

Com este fim, deverão ser identificados os usos atuais e definido um cenário, correspondente a uma visão de longo prazo, compatível com o horizonte do PNRH, para a utilização múltipla da água na bacia. Sobre este cenário os benefícios energéticos e os impactos socioambientais positivos e negativos das alternativas serão avaliados.

Para sua elaboração, deve-se tomar como base as seguintes informações: a) as estimativas de usos consuntivos da água elaborados pela Agência Nacional de Águas (ANA) e pelos demais órgãos estaduais outorgantes de recursos hídricos; b) o Plano Nacional de Recursos Hídricos, os Planos Estaduais de Recursos Hídricos e os planos de recursos hídricos de bacias hidrográficas; c) os planos diretores de desenvolvimento integrado, programas de irrigação, estudos de navegação, de controle de cheias e de abastecimento da água humano, animal e industrial, d) usos não consuntivos, tais como turismo, lazer, preservação cênica e áreas de proteção ambiental, procurando-se obter um retrato realista e compatibilizado das possibilidades de desenvolvimento da bacia.

No SINV este cenário é definido especificando-se:

- para cada local barrável as vazões mínimas necessárias para manutenção da qualidade da água e/ou tirantes para navegação, os totais de perdas líquidas de vazão devido a captações d'água a montante para irrigação e para outros usos;
- os projetos que devem ser a fio d'água e para cada projeto de regularização um limite inferior para o nível d'água mínimo no reservatório do aproveitamento;
- e para cada alternativa de divisão de queda, os volumes a alocar para controle de cheias em cada um dos seus reservatórios.

2.6 CONCEITOS DE NATUREZA ENERGÉTICA

2.6.1 Sistema de Referência

Entende-se por sistema de referência o conjunto de usinas geradoras de energia elétrica, em relação ao qual os benefícios energéticos das alternativas em exame devem ser quantificados. O sistema de referência deve ser caracterizado pelo sistema eletro-energético ao qual os aproveitamentos inventariados serão interligados.

2.6.2 Período Crítico

O período crítico de um sistema é definido como aquele período do histórico em que os reservatórios do sistema são plenamente utilizados, no início do período estão cheios e ao final, totalmente deplecionados. De acordo com o Manual de Inventário as avaliações dos benefícios energéticos devem ser feitas em relação ao período crítico do sistema de referência. No SINV este período deve ser informado explicitamente pelo usuário. O sistema SINV contém também um módulo (item 3.9) capaz de determinar o período crítico da bacia em estudo a partir do seu registro histórico de afluições naturais.

2.6.3 Benefícios Energéticos para Fins de Inventário

Ao ser integrada a um sistema, uma usina hidroelétrica ou um conjunto de usinas propicia ao sistema três tipos de benefícios energéticos: energia firme, energia secundária e capacidade de ponta. A energia firme corresponde à maior carga que o sistema garante atender mesmo nas piores condições hidrológicas registradas no histórico; a energia secundária corresponde à energia disponível em períodos de hidrologia favorável; e a capacidade de ponta representa a capacidade máxima de produção do sistema durante o intervalo de tempo correspondente à ponta da carga.

A energia firme representa, nos estudos de inventário, a variável decisória para a análise dos benefícios energéticos de uma alternativa, pois representa o aproveitamento de um recurso escasso. A inclusão dos benefícios de ponta, de forma explícita, na análise econômica para a comparação de alternativas de divisão de queda, não se justifica, na etapa de inventário, pois o acréscimo da disponibilidade de ponta depende essencialmente da motorização. Nesta etapa, para garantir uma comparação homogênea entre as alternativas e entre projetos, estes são dimensionados para um fator de capacidade de referência comum a todos os projetos da bacia. A energia secundária não é considerada nesta etapa devido ao alto grau de incerteza quanto ao seu efetivo aproveitamento.

Energia Firme

Para os estudos de inventário, a energia firme de uma usina, ou de um conjunto de usinas, é considerada como a energia média gerada pela usina, ou pelo conjunto de usinas, obtida através de simulações da operação do sistema ao longo do período crítico do sistema de referência. Na fase de Estudos Preliminares pode-se usar estimativas expeditas, obtidas através do uso das fórmulas apresentadas no item 3.2.1.

Ganho de Energia Firme

O ganho de energia firme associado a uma usina, ou a um conjunto de usinas, é o acréscimo na energia firme do sistema de referência proporcionado pela adição deste projeto ou conjunto de

projetos ao conjunto de aproveitamentos da bacia. Em geral este acréscimo é maior ou igual à energia firme dos aproveitamentos analisados, já que a adição de projetos também proporciona acréscimos de energia firme em outros aproveitamentos da bacia. Assim como a energia firme, o ganho de energia firme deve ser obtido através de simulações da operação do sistema ao longo do período crítico do sistema de referência podendo-se, na fase de Estudos Preliminares usar estimativas expeditas, obtidas através do uso das fórmulas apresentadas no item 3.2.1.

2.6.4 Dimensionamento Energético

O dimensionamento energético de um aproveitamento hidroelétrico corresponde à definição dos limites de operação para os níveis de montante e jusante em conjunto com as características do conjunto turbina-gerador que definem a curva de variação com a queda da capacidade de geração do aproveitamento. O dimensionamento energético requer, portanto, a determinação dos níveis máximos e mínimos de operação normal do reservatório, da capacidade total dos geradores a serem instalados (potência instalada), e da vazão nominal do conjunto de turbinas, ou seja do engolimento máximo do conjunto de turbinas do aproveitamento na situação de queda líquida correspondente ao fornecimento pelas turbinas da potência instalada (queda de referência). A definição final do dimensionamento ótimo para efeito de licitação para concessão de aproveitamentos hidroelétricos é feita no âmbito de Estudos de Viabilidade seguindo uma abordagem de custo/benefício, onde para cada alternativa de dimensionamento do aproveitamento são feitos orçamentos e avaliados os benefícios em termos de energia firme, disponibilidade de ponta e energia. Já em Estudos de Inventário Hidroelétrico, o foco está na escolha da melhor alternativa de divisão de queda da bacia, ou seja, do melhor conjunto de aproveitamentos, não se cogitando de aprofundar os estudos a nível de aproveitamento. Por outro lado há a necessidade de se adotar algum critério de dimensionamento, para que se possa não só contar com um orçamento por aproveitamento, permitindo a avaliação dos custos de cada alternativa pela soma dos orçamentos dos seus aproveitamentos, como também para que se possa avaliar por simulações os benefícios energéticos das diversas alternativas de divisão de queda analisadas.

Duas características básicas de Estudos de Inventário Hidroelétrico orientam a definição dos critérios de dimensionamento energético nesta fase. A primeira é, a exemplo do adotado nas avaliações econômico-energéticas (ver item 2.6.3), o uso da energia firme como variável decisória, não se considerando a disponibilidade de energia secundária e apenas de forma implícita a disponibilidade de ponta. A segunda é a característica preliminar do dimensionamento, devendo-se adotar critérios de dimensionamento que não limitem o aproveitamento do potencial.

A consideração da energia firme para dimensionamento energético indica a necessidade do uso de simulações da operação do sistema ao longo do período crítico do sistema de referência. Como os resultados de simulações dependem da definição do dimensionamento energético de todos

aproveitamentos sendo simulados, em geral o processo de dimensionamento deve ser iterativo e feito concomitantemente para os três itens (níveis de operação, geradores e turbinas) e para o conjunto de aproveitamentos. Também, como a energia firme de um aproveitamento depende da alternativa de divisão de queda na qual ele se integra, o seu dimensionamento poderá variar de alternativa para alternativa. Em geral, em Estudos de Inventário procura-se adotar um único dimensionamento para cada aproveitamento, devendo-se escolher o dimensionamento que não limita o aproveitamento do potencial em qualquer das alternativas.

Nível Máximo

Em Estudos de Inventário Hidroelétrico os níveis máximos de operação do reservatório não são submetidos a processo de otimização sendo fixados na própria definição dos aproveitamentos. Nas avaliações energéticas considera-se o efeito dos volumes de espera nas quedas disponíveis.

Depleção Máxima

No desenvolvimento do potencial hidroelétrico de uma bacia deve ser sempre previsto quando possível a construção de aproveitamentos com capacidade de armazenamento de forma a que se possa obter energia durante os períodos mais secos a partir do uso da água armazenada durante os períodos hidraulicamente mais favoráveis. Por outro lado o excessivo deplecionamento dos aproveitamentos se reflete em perda de queda e, portanto, na capacidade de geração que reflete na energia gerada durante o período crítico (energia firme). A fixação da depleção máxima, ou do volume útil, de cada aproveitamento de uma alternativa deve ser feita por processo de otimização tendo como base o ganho de energia firme do aproveitamento quando integrado na alternativa de divisão de queda em análise. Para um dado aproveitamento pode-se adotar como dimensionamento final de sua depleção máxima a maior dentre as depleções ótimas obtidas para o aproveitamento em cada uma das alternativas analisadas.

Recomenda-se ainda, para evitar a perda de capacidade de ponta e dificuldades de enchimento inicial e reenchimento durante a operação, pré-limitar o deplecionamento máximo dos aproveitamentos a 2/3 da queda bruta. Deve-se também considerar no processo de dimensionamento da depleção máxima os limites mínimos para o nível mínimo de operação devido aos outros usos da água (item 2.5).

Queda de Referência

Para fins de Inventário considera-se como queda de referência a queda líquida média do aproveitamento, definida pelo reservatório do aproveitamento no seu nível médio e um nível representativo do nível d'água no canal de fuga obtido pela média dos valores provenientes da

simulação durante o período crítico. Quando não se dispõe da curva-chave do canal de fuga do aproveitamento pode-se considerar os níveis de cada mês como o correspondente à uma vazão 10% maior que a vazão média ao longo do período crítico do sistema de referência ou, o nível d'água do reservatório de jusante do mês quando este for superior. Por este critério, a queda de referência de um aproveitamento pode variar conforme a alternativa em que ele esteja sendo analisado, podendo-se nestes casos, adotar para efeito de Estudos de Inventário a menor delas.

Potência Instalada e Fator de Capacidade de Referência

De forma a garantir que a comparação dos benefícios energéticos seja feita de forma homogênea sob o ponto de vista dos benefícios de ponta, em Estudos de Inventário Hidroelétrico o dimensionamento da potência instalada de cada projeto é feito considerando um mesmo fator de capacidade de referência.

Aplicando-se o fator de capacidade de referência à energia firme de um aproveitamento quando integrado numa certa alternativa de divisão de queda, obtém-se a sua potência instalada para a alternativa analisada, ou seja:

$$P_{INST_i} = \frac{EF_i}{FCAPS}$$

onde:

P_{INST_i} - Potência instalada do aproveitamento i ;

EF_i - Energia firme do aproveitamento i ; e

FCAPS - Fator de capacidade de referência.

Como dimensionamento final da potência instalada de um aproveitamento deve-se tomar a maior das potências instaladas obtidas na análise de cada alternativa estudada.

Queda Líquida Média

Para fins de Inventário Hidroelétrico o dimensionamento de um aproveitamento é feito de forma a garantir o fornecimento da sua potência instalada com as turbinas totalmente abertas na situação de queda líquida mais representativa do deplecionamento do reservatório do aproveitamento durante o período crítico do sistema de referência. Ao se analisar uma alternativa de divisão de queda toma-se como queda líquida representativa para cada aproveitamento a média das suas quedas líquidas verificadas em estudos de simulação da operação ao longo do período crítico do sistema de referência (ver item 3.2.2). Na fase de Estudos Preliminares pode-se usar estimativas expeditas, obtidas através do uso das fórmulas apresentadas no item 3.2.1.

Vazão nominal

Definidas a queda de referência e a potência instalada de um aproveitamento a vazão nominal do conjunto de turbinas é obtida por:

$$QNOM_i = \frac{P_{INST_i}}{9,81 \times 10^{-6} \times h_{ref_i} \times REND_i}$$

onde:

REND_i - Rendimento global do conjunto turbina-gerador (fornecido pelo usuário).

Interdependência entre os parâmetros de dimensionamento energético

O dimensionamento energético de um aproveitamento hidroelétrico nos Estudos de Inventário corresponde à definição da depleção máxima, da queda de referência e da potência instalada, ficando a vazão nominal para ser definida em função da potência instalada e da queda de referência. Pelo visto acima nenhum dos três primeiros parâmetros de dimensionamento energético pode ser obtido independentemente dos demais parâmetros. Com efeito, o dimensionamento da queda de referência de um aproveitamento é feito em função do nível médio no canal de fuga obtido em estudos de simulação, cujos resultados dependem dos níveis de operação do aproveitamento de jusante e da vazão nominal da turbina no aproveitamento em análise, assim como depende de todos os parâmetros de dimensionamento energético dos outros aproveitamentos. Já o dimensionamento da potência instalada de um aproveitamento é feito em função da sua energia firme obtida em estudos de simulação, cujos resultados dependem dos níveis de operação e da vazão nominal da turbina no aproveitamento em análise, assim como depende de todos os parâmetros de dimensionamento energético dos outros aproveitamentos. O dimensionamento do nível mínimo de operação, por sua vez, é obtido também em função dos resultados da simulação (especificamente, em função do total de energia firme da alternativa), logo depende da potência instalada e da vazão nominal no aproveitamento em análise, assim como depende de todos os parâmetros de dimensionamento energético dos outros aproveitamentos.

O sistema SINV, além das funções para dimensionamento em separado da potência instalada (Energia Firme - item 3.2) e das depleções máximas (Otimização Volume Útil - item 3.3) dos aproveitamentos de uma alternativa, disponibiliza a função Dimensionamento Energético (item 3.4) que, considerando um conjunto de alternativas, dimensiona concomitantemente queda de referência, depleção máxima e potência instalada de todos os aproveitamentos estudados.

2.6.5 Custos de Referência

Custo unitário de referência de energia - CRE

É o valor, em R\$/MWh, a partir do qual a contribuição de energia firme que uma usina, ou uma configuração de usinas, adiciona ao sistema deixa de ser economicamente competitiva com outras fontes de energia. Corresponde ao custo de produção de energia pura de uma fonte alternativa de energia num horizonte de longo prazo no sistema de referência.

Custo unitário de referência de ponta - CIP

É o valor, em R\$/kW/ano, a partir do qual o benefício de motorização adicional de usinas convencionais deixa de ser economicamente competitivo. Corresponde ao custo de instalação de ponta pura de uma fonte alternativa de ponta, num horizonte de longo prazo no sistema de referência.

Custo unitário de referência - CUR

É o valor, em R\$/MWh, acima do qual a contribuição energética das usinas, ou das configurações de usinas, deixa de ser economicamente competitiva. Corresponde ao custo de longo prazo no sistema de referência para a produção de energia a um fator de capacidade *FCAPS*; resultante da combinação da fonte alternativa de energia e da fonte alternativa de ponta. O valor do CUR é calculado pela seguinte expressão.

$$CUR = CRE + \frac{CIP}{8,76 \times FCAPS}$$

2.6.6 Índices Custo/Benefício Energético

As análises e comparações econômico-energéticas realizadas em Estudos de Inventário Hidroelétrico tem como base índices custo/benefício energético, expressos em R\$/MWh e calculados sempre como a razão entre o custo de um aproveitamento ou de um grupo de aproveitamentos e o correspondente acréscimo na energia firme do sistema de referência (ganho de energia firme).

Uma vez que um aproveitamento propicia geração de energia elétrica, tanto no próprio local do aproveitamento, cujo montante depende da regularização das vazões promovida pelos aproveitamentos a montante, quanto nos aproveitamentos de jusante; o ganho de energia firme de um aproveitamento ou de um grupo de aproveitamentos depende da configuração na qual ele se integra.

Um índice custo/benefício é sempre calculado tomando como referência uma certa Alternativa de Divisão de Queda. Conhecida a Alternativa de Divisão de Queda, este índice pode ser calculado isoladamente para cada aproveitamento ou para cada grupo de aproveitamentos da alternativa. Existe também um índice custo/benefício energético para a alternativa como um todo.

ICB de Aproveitamento

O benefício energético de cada aproveitamento de uma alternativa é medido pelo acréscimo na energia firme do sistema de referência proporcionada pela adição do aproveitamento, supondo todos os outros aproveitamentos da alternativa como já construídos (ganho de energia firme em última adição). O índice custo/benefício energético de cada aproveitamento é definido como a razão entre o seu custo total anual e o seu benefício energético. É calculado pela seguinte expressão:

$$ICB_i = \frac{CT_i}{8760 \times \Delta EF_i}$$

onde:

ICB_i - índice custo/benefício energético da usina *i*, em R\$/MWh;

CT_i - custo total anual da usina *i*, em R\$; e

ΔEF_i - acréscimo de energia firme do sistema de referência propiciado pela adição da usina *i* considerando todos os outros aproveitamentos da alternativa já construídos, em Mw médios.

O custo total anual (CT_i) de cada usina é calculado pela expressão:

$$CT_i = C_i \times FRC + 10^3 \times PINST_i \times COM_i$$

onde:

C_i - custo de implantação do aproveitamento *i*, em R\$, incluindo juros durante a construção;

PINST_i - potência instalada do aproveitamento, em MW;

COM_i - custo anual de operação e manutenção do aproveitamento *i*, em R\$/kW/ano; e

FRC - fator de recuperação de capital, ao longo da vida econômica útil do aproveitamento, segundo a taxa de desconto adotada, definido pela expressão seguinte:

$$FRC = \frac{j \times (1 + j)^z}{(1 + j)^z - 1}$$

Onde:

j - taxa anual de desconto; e

z - vida econômica útil das usinas hidroelétricas, em anos.

ICB de Grupo de Aproveitamentos

O benefício energético de um grupo de aproveitamentos é medido pelo acréscimo na energia firme do sistema de referência propiciado pela adição simultânea de todos os aproveitamentos do conjunto, supondo todos os outros aproveitamentos da alternativa como já construídos. O índice custo/benefício energético do grupo é então definido como a razão entre o custo anual do conjunto e o seu benefício energético.

ICB de Alternativa

Uma vez que cada alternativa de divisão de queda pode fornecer ao sistema de referência um ganho de energia firme diferente, a comparação das alternativas entre si requer uma homogeneização destes valores. Isto é feito complementando a produção associada às alternativas com menor ganho de energia firme, até o maior valor dentre todos, ao custo unitário de referência.

O índice custo/benefício energético de cada alternativa, que será o parâmetro com o qual ela será avaliada energeticamente, é dado por:

$$ICB_a = \frac{CT_a + 8760 \times CUR \times (\Delta EF^* - \Delta EF_a)}{8760 \times \Delta EF^*}$$

Onde:

ICB_a - índice custo/benefício energético da alternativa a , em R\$/MWh;

ΔEF^* - ganho de energia firme fornecida pela alternativa com maior produção no conjunto das analisadas, em MW médios;

ΔEF_a - ganho de energia firme fornecida pela alternativa a , em MW médios; e

CT_a - custo total anual da alternativa a , depois que todos os aproveitamentos não econômicos forem eliminados, em R\$.

Deve-se ressaltar que o ganho de energia firme da alternativa, ΔEF_a , não é calculado como a soma dos ganhos de energia firme de última adição dos aproveitamentos que a compõem, pois isto significaria somar mais de uma vez os benefícios de um aproveitamento em outro. O ganho de energia firme da alternativa é calculada nos estudos preliminares através do cálculo simplificado (item 3.2.1), e nos estudos finais por simulação (item 3.2.2).

2.6.7 Competitividade Econômica-Energética

Um projeto ou um grupo de projetos só é considerado economicamente competitivo se seu índice custo/benefício energético for menor que o custo unitário de referência. A análise econômico-

energética de uma Alternativa de Divisão de Queda deve sempre incluir a eliminação dos seus projetos e grupos de projetos não-competitivos (item 3.6).

2.6.8 Custos Incrementais

O custo incremental de um aproveitamento ou de um grupo de aproveitamentos é calculado de forma similar ao índice custo/benefício energético, modificando-se apenas o cálculo do ganho de energia firme, que passa a ser obtido considerando como construídos somente os aproveitamentos existentes e aqueles aproveitamentos que na Ordem Econômica de Construção (item 2.6.9) da alternativa analisada estejam apontados para serem construídos antes dos aproveitamentos em análise.

2.6.9 Ordem Econômica de Construção de uma Alternativa

Os estudos de ordenação econômica da construção dos aproveitamentos de uma Alternativa de Divisão de Queda são feitos nos Inventários Hidroelétricos tomando-se como critério os custos incrementais. Ou seja, considerando-se dois aproveitamentos, o aproveitamento de menor custo incremental deve ser construído antes do de maior custo incremental.

A Ordem Econômica de Construção de uma Alternativa de Divisão de Queda é, portanto, obtida colocando-se os aproveitamentos da alternativa em ordem crescente de custo incremental. Como a obtenção dos custos incrementais depende do conhecimento da Ordem Econômica de Construção, esta ordenação é iterativa (ver item 3.8).

2.7 CONCEITOS DE NATUREZA AMBIENTAL

2.7.1 Sistema Ambiental

Entende-se por sistema ambiental o conjunto dos elementos existentes na área de estudo, incluindo seus atributos ou qualidades, as funções que exercem nos processos e suas interações.

A análise do sistema ambiental requer a consideração dos seus processos físico-bióticos, sociais, culturais, econômicos e políticos, bem como das suas inter-relações e de seus rebatimentos espaciais.

2.7.2 Componentes-síntese

Para representação do sistema ambiental adota-se uma estrutura analítica composta por seis componentes, denominados componentes-síntese: Ecossistemas Aquáticos, Ecossistemas Terrestres, Modos de Vida, Organização Territorial, Base Econômica e População Indígena.

Estes **componentes-síntese** são estruturados a partir da inter-relação entre vários elementos do sistema ambiental, denominados **elementos de caracterização**, proporcionando uma noção de conjunto dos processos envolvidos em seu campo de análise. Destaca-se, nesse sentido, que existem elementos de caracterização que estão presentes em mais de um componente, assumindo diferentes funções nos processos inerentes a cada um deles.

Deve ser observado que os processos e atributos físicos, por promoverem o suporte e a articulação entre os processos ambientais, não são aqui considerados como um componente-síntese, mas sim como elementos básicos para as análises dos seis componentes adotados. Da mesma forma, os aspectos relativos ao patrimônio histórico, cultural, arqueológico, espeleológico, paisagístico e ecológico, são considerados como elementos de caracterização, de acordo com as relações estabelecidas com os componentes-síntese.

No SINV, para cada componente-síntese, devem ser indicados os elementos de caracterização utilizados para a construção do componente na área de estudo e respectivas fontes de informação. Deve também ser indicado o peso do componente (entre zero e um), que representa a importância relativa entre os processos impactantes de cada componente-síntese sobre o sistema ambiental, em função da repercussão de tais processos sobre os demais componentes.

2.7.3 Subáreas

Como os Estudos de Inventário envolvem a comparação de um conjunto de aproveitamentos que se combinam em diferentes arranjos espaciais sobre a base territorial da bacia hidrográfica, a dimensão espacial adquire grande relevância. Nesse sentido, cada componente-síntese deverá ser representado espacialmente e compartimentado em sub-unidades de análise, denominadas **subáreas**. Estas subáreas são definidas como recortes territoriais contínuos que apresentam relações e processos particulares que a distinguem das demais, e que determinam sua relação com a dinâmica do componente-síntese na área de estudo como um todo.

No caso do componente-síntese **População Indígena / Tradicionais** considera-se uma única unidade espacial de análise, ou seja, toda área de estudo, não sendo então definidas subáreas.

No SINV cada subárea deverá ser acompanhada de uma descrição, caracterizando-a e enfatizando os processos mais relevantes para sua definição e situando-as no contexto da área total de estudo, de modo a possibilitar a compreensão das relações de cada subárea com as demais. Deve também ser indicado o peso atribuído a cada subárea (entre zero e um), estabelecido em função da repercussão na área de estudo dos processos impactantes que ocorrem nesta subárea. Para cada componente, a soma dos pesos relativos entre subáreas deve ser igual à unidade.

2.7.4 Impacto Socioambiental Negativo

Considera-se **Impacto Socioambiental Negativo** a alteração potencialmente desfavorável causada por um aproveitamento ou conjunto de aproveitamentos sobre um componente-síntese ou sobre o sistema ambiental, tendo-se como referência a situação atual da área de estudo e suas tendências evolutivas. Os impactos socioambientais negativos serão avaliados e traduzidos em índices socioambientais, que serão associados ao objetivo “minimizar os impactos socioambientais negativos”.

A avaliação dos impactos socioambientais negativos deve então contemplar a identificação das alterações desfavoráveis. As ações que evitem, reduzam ou compensem os impactos serão traduzidas em custos a serem efetivamente internalizados no custo de implantação do aproveitamento. Os impactos ambientais sobre os quais não é possível haver controle, ou os impactos residuais quando da existência de controle, compensação ou mitigação (custos de degradação) serão traduzidos em índices ambientais.

2.7.5 Impacto Socioambiental Positivo

Considera-se **Impacto Socioambiental Positivo** a alteração potencialmente favorável causada por um aproveitamento ou conjunto de aproveitamentos, tendo-se como referência a situação atual da área de estudo e suas tendências evolutivas. Deverão ser considerados impactos relacionados somente aos **aspectos socioeconômicos** para os quais a implantação dos aproveitamentos hidroelétricos possa aportar contribuições favoráveis para o desenvolvimento da socioeconomia local e regional.

A avaliação dos impactos socioambientais positivos deve contemplar a identificação das alterações favoráveis, sendo avaliados e traduzidos em um índice de impacto socioambiental positivo a ser utilizado para a seleção final da alternativa de divisão de queda. Esta avaliação só será realizada **na etapa dos Estudos Finais**.

2.7.6 Indicador de Impacto/Critério de Avaliação/ Elementos de Avaliação

O **indicador de impacto** norteia a avaliação dos impactos ambientais de um aproveitamento ou conjunto de aproveitamentos sobre um componente-síntese, determinando o enfoque da análise. O indicador de impacto é construído a partir da combinação de uma ou mais variáveis, aqui denominados **elementos de avaliação**, para caracterizar um ou mais efeitos esperados para um local ou locais na bacia hidrográfica.

Para cada um dos indicadores deverão ser definidos os critérios de avaliação que irão orientar a atribuição dos graus de impacto. Para os impactos positivos, a metodologia já estabelece os aspectos a serem considerados na análise e o conjunto de indicadores a serem utilizados.

No SINV, devem ser indicados para cada componente-síntese o indicador de impacto e respectivos critérios de avaliação envolvidos na análise, bem como os elementos de avaliação considerados na avaliação.

2.7.7 Índices Socioambientais

O índice socioambiental deve expressar a intensidade do impacto sobre um componente-síntese ou sobre o sistema ambiental. Os índices de impacto devem ser atribuídos em uma escala contínua variando de **zero** (mínimo impacto) a **um** (máximo impacto).

O **índice de impacto socioambiental negativo de uma alternativa sobre o sistema ambiental (IA)** expressa o impacto total do conjunto de aproveitamentos que a compõem sobre a área de estudo, traduzindo portanto o seu grau de atendimento ao objetivo de minimização dos impactos ambientais.

O **índice de impacto socioambiental positivo de uma alternativa (IAp)**, relativo aos aspectos do sistema socioambiental selecionados para a análise, expressa o impacto socioambiental positivo total sobre a área de estudo e será calculado somente para as alternativas de divisão de queda selecionadas para os **Estudos Finais**.

Os procedimentos para obtenção dos índices estão descritos a seguir.

2.7.8 Avaliação de Impactos de Aproveitamentos sobre um Componente-síntese

Estudos Preliminares

Nos Estudos Preliminares, as análises relativas aos impactos socioambientais negativos devem ser conduzidas para cada aproveitamento isoladamente, sem considerá-lo no contexto das alternativas

em que estiver inserido. Essa contextualização tornaria a análise excessivamente complexa e extensa, devido ao elevado número de aproveitamentos e alternativas normalmente considerado. Por esse motivo, tal procedimento deverá ser adotado somente nos Estudos Finais, após a pré-seleção das alternativas mais interessantes sob o ponto de vista econômico-energético e ambiental.

A estimativa da intensidade do impacto do aproveitamento sobre cada componente-síntese deverá ser realizada para cada subárea afetada pelo aproveitamento, com base nos indicadores de impacto e seus critérios de avaliação, devendo ser registradas as justificativas para os índices atribuídos. Esta avaliação deve ser traduzida num índice de impacto na escala contínua variando de **zero** a **um**. A título de exemplo, apresenta-se na tabela 1 a seguir o resultado da avaliação de impacto para um determinado componente-síntese.

Tabela 1 - Índices de Impacto por Aproveitamento para um Componente-Síntese.

| Aproveitamentos | Subáreas | | | | | |
|-----------------|----------|------|------|------|------|------|
| | I | II | III | IV | V | VI |
| A | | 0.10 | | | | |
| B | | 0.50 | 0.65 | 0.10 | | |
| C | | | 0.85 | | 0.35 | |
| D | | | 0.70 | | | |
| E | 0.05 | 0.05 | | | | |
| F | 0.08 | 0.08 | | | | |
| G | 0.10 | | | | | |
| H | 0.10 | | | | 0.10 | |
| I ₁ | 0.30 | | 0.10 | | 0.30 | |
| I ₂ | 0.85 | | 0.10 | | 0.85 | |
| J | | | 0.60 | | 0.30 | |
| L | | | 0.75 | 0.40 | 0.60 | |
| M | 0.30 | | | | | 0.40 |
| N | 0.50 | | 0.90 | | | |
| O | | | | | | 0.88 |
| P | | | | | | 0.40 |
| Q ₁ | | | | | | 0.80 |
| Q ₂ | | | | | | 0.85 |

Estudos Finais

Nos Estudos Finais a análise dos impactos socioambientais negativos se dará ao nível de conjuntos de aproveitamentos que compõem uma alternativa e não mais para aproveitamentos isolados, tendo em vista incluir na avaliação de impactos a consideração dos efeitos cumulativos e sinérgicos entre os aproveitamentos de uma mesma alternativa. Neste sentido, os estudos relativos à identificação, previsão e avaliação dos impactos negativos e respectiva atribuição de índices de impactos por componente-síntese, serão realizados para conjuntos de aproveitamentos que impactem uma mesma subárea, conforme será descrito a seguir.

2.7.9 Avaliação de Impacto Socioambiental da AlternativaÍndice de impacto socioambiental negativo da alternativa sobre componente-síntese

O **índice de impacto socioambiental negativo** da alternativa de divisão de queda sobre componente-síntese deve representar o impacto do conjunto de aproveitamentos sobre o componente-síntese na área de estudo. Para tanto, torna-se necessário considerar, além dos processos impactantes de cada aproveitamento analisado isoladamente, os efeitos cumulativos e sinérgicos entre os aproveitamentos que afetam uma mesma subárea, bem como os efeitos cumulativos e sinérgicos entre os processos impactantes das diferentes subáreas. Como tal consideração acarreta maior complexidade para a análise, nos Estudos Preliminares, adota-se uma simplificação com relação à consideração dos efeitos sinérgicos, com a finalidade de pré-selecionar as alternativas que merecerão análise mais detalhada nos Estudos Finais.

Estudos Preliminares

Para compor o **índice de impacto negativo** da alternativa sobre cada componente-síntese (IAC) são adotados os seguintes procedimentos:

a) Obtenção do índice de impacto negativo da alternativa sobre componente-síntese em cada subárea

Nesta etapa propõe-se um procedimento simplificado¹ para o cálculo do índice de impacto cumulativo em cada subárea. Seja n o número de aproveitamentos da alternativa em análise que impactam uma subárea j . A partir dos índices de impacto negativo atribuídos isoladamente a cada um destes aproveitamentos $I_{SA}(j,i)$, $i=1,..,n$, obtém-se o impacto cumulativo de todos os aproveitamentos através da seguinte iteração:

$$I_{SA}^c(j,i) = I_{SA}^c(j,i-1) + [(1 - I_{SA}^c(j,i-1)) * I_{SA}(j,i)], \quad i = 1, \dots, n$$

Onde:

$I_{SA}(j,i)$ - Impacto na subárea j quando se instala apenas o i -ésimo aproveitamento da alternativa; e

$I_{SA}^c(j,i)$ - impacto cumulativo na subárea j quando se instalam os aproveitamentos 1, 2, ..., i da alternativa.

Sendo $I_{SA}^c(j,0) = 0$ o valor inicial do impacto cumulativo.

¹ - Adaptado de EPE/CNEC/Arcadis Tetraplan – “Avaliação Ambiental Integrada dos Aproveitamentos Hidrelétricos na Bacia do Rio Tocantins – Relatório P3 - Avaliação Ambiental Distribuída e Conflitos”, março/2007.

Após realizadas todas as iterações (considerando todos os aproveitamentos de alternativa instalados) obtém-se o impacto cumulativo na subárea j:

$$I_{SA}^C(j) = I_{SA}^C(j,n)$$

No caso do componente População Indígena, como a unidade espacial de análise é a área de estudo, adota-se o mesmo procedimento considerando-se uma única subárea.

b) Agregação dos índices de impacto negativo relativos às subáreas em índice de impacto negativo da alternativa sobre componente-síntese na área de estudo.

O índice de impacto negativo da alternativa sobre componente-síntese na área de estudo (IAC) será obtido pela soma ponderada dos índices de impacto relativos às subáreas, ou seja:

$$IAC = \sum_j I_{SA}^C(j) P(j)$$

Onde:

P(j) - fator de ponderação relativo a cada sub-área i.

Os fatores de ponderação entre as subáreas, definidos na etapa de diagnóstico, são utilizados para possibilitar a relativização dos índices de impacto nas subáreas no contexto da área de estudo. Visando manter os valores de IAC entre zero e um, os pesos P(j)i devem ser atribuídos também em uma escala contínua de zero a um, devendo ser a soma dos pesos de todas as subáreas igual à unidade.

No caso do componente População Indígena, uma vez que a unidade espacial de análise é a própria área de estudo, não há fatores de ponderação.

O cálculo do índice está ilustrado na Tabela 2:

Tabela 2 - Índice de Impacto Negativo de Alternativa sobre o Componente-Síntese.

| Subáreas | I | II | III | IV | V | VI | |
|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|
| Pesos | 0.07 | 0.08 | 0.18 | 0.12 | 0.25 | 0.30 | |
| Aproveitamentos | | | | | | | |
| A | | 0.10 | | | | | |
| B | | 0.50 | 0.65 | 0.10 | | | |
| C | | | 0.85 | | 0.35 | | |
| F | | 0.08 | | | | | |
| G | 0.10 | | | | | | |

| | | | | | | | |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------------|
| H | 0.10 | | | | 0.10 | | |
| I | 0.30 | | 0.10 | | 0.30 | | |
| M | 0.30 | | | | | 0.40 | |
| N | 0.50 | | 0.90 | | | | |
| Q₂ | | | | | | 0.95 | |
| I ^c _{SA} (j) | 0.801 | 0.586 | 0.990 | 0.10 | 0.590 | 0.970 | IAC |
| I ^c _{SA} (j) P(j) | 0.056 | 0.047 | 0.179 | 0.012 | 0.148 | 0.291 | 0.73 3 |

c) Composição do índice de impacto negativo da alternativa sobre o sistema socioambiental

O **índice de impacto negativo** da alternativa sobre o sistema socioambiental (**IA**) deve expressar o seu impacto negativo total sobre a área de estudo, ou seja, deve considerar os impactos causados pela alternativa sobre todos os componentes-síntese.

Este índice é obtido pela soma ponderada **dos índices de impacto negativo da alternativa sobre componente-síntese (IAC)**, calculados anteriormente.

$$IA = \sum IAC_i \times P_{ci}$$

Onde:

P_{ci} - fator de ponderação relativo a cada componente-síntese.

Estudos Finais

Em relação **aos impactos socioambientais negativos**, os estudos obedecem à mesma estrutura básica dos Estudos Preliminares, embora com algumas diferenciações relativas ao grau de detalhamento e aprofundamento.

Nesta fase, ganha importância a análise dos **impactos socioambientais positivos**, que será realizada diretamente para os conjuntos de aproveitamentos de cada alternativa.

a) Índice de Impacto Socioambiental Negativo

O **índice de impacto negativo da alternativa sobre componente-síntese** na área de estudo (**IAC**) é obtido de modo similar aos Estudos Preliminares, ou seja, pela soma ponderada dos índices de impacto relativos às subáreas, incluindo os efeitos cumulativos e sinérgicos entre os aproveitamentos que a afetam.

A atribuição de um índice de impacto socioambiental negativo sobre componente-síntese, por subárea afetada (**ISAI**), relativo ao conjunto de aproveitamentos que a impactam, deve ser realizada conforme exemplificado na tabela 3. Essa atividade é orientada pelos indicadores de impacto e baseada nos elementos de avaliação selecionados em função das especificidades dos processos impactantes e da cumulatividade ou sinergia identificada. Para melhor retratar a cumulatividade, a atribuição de graus não deve partir dos índices de impacto de cada aproveitamento agregados para cada subárea obtidos nos Estudos Preliminares, mas sim partir dos elementos de avaliação de cada processo impactante relativo aos aproveitamentos que afetam cada subárea.

No SINV, devem ser definidos e explicitados os indicadores e critérios para atribuição de graus. Os graus de impacto deverão ser atribuídos ao conjunto de aproveitamentos na subárea de modo a incorporar, quando pertinente, a cumulatividade existente entre os efeitos destes aproveitamentos.

$$IAC = \sum I_{SAi} \times P_{SAi}$$

Onde:

I_{SAi} - índice de impacto sobre componente relativo ao conjunto de aproveitamentos que afetam a subárea i; e

P_{SAi} - fator de ponderação relativo a cada subárea i, para determinado componente-síntese.

O cálculo do índice está ilustrado na tabela 3.

Tabela 3 - Índice de Impacto Socioambiental Negativo de Alternativa sobre Componente-Síntese.

| Subáreas | I | II | III | IV | V | VI | |
|-------------------------------|----------|-----------|------------|-----------|----------|-----------|------------|
| Peso | 0.07 | 0.08 | 0.18 | 0.12 | 0.25 | 0.30 | |
| Aproveita- mentos | | | | | | | |
| A | | x | | | | | |
| B | | x | x | x | | | |
| C | | | x | | x | | |
| F | | x | | | | | |
| G | x | | | | | | |
| H | x | | | | x | | |
| I | x | x | x | x | x | | |
| M | x | | | | | x | |
| N | x | | x | | | | |
| Q ₂ | | | | | | x | |
| ISAI | 0.65 | 0.55 | 0.95 | 0.20 | 0.40 | 1.0 | IAC |
| ISAI × P_{SAi} | 0.045 | 0.044 | 0.171 | 0.024 | 0.10 | 0.30 | 0.684 |

Índice de Impacto Negativo da Alternativa sobre o Sistema Ambiental

O **índice de impacto de alternativa sobre o sistema ambiental (IA)** deve expressar o seu impacto total sobre a área de estudo, ou seja, deve considerar os impactos causados pela alternativa sobre todos os componentes-síntese. Adota-se os mesmos procedimentos considerados para os Estudos Preliminares, quais sejam:

$$IA = \sum IAC_i \times P_{ci}$$

Onde:

P_{ci} - fator de ponderação relativo a cada componente-síntese.

b) Índice de Impacto Socioambiental Positivo

O **índice de impacto positivo da alternativa sobre componente-síntese** na área de estudo (**IAp**), deverá expressar as alterações favoráveis para o desenvolvimento da socioeconomia local e regional devidas à implantação do conjunto de aproveitamentos hidroelétricos. Deverão ser considerados os impactos positivos socioeconômicos, locais e regionais, relativos aos seguintes aspectos:

- mercado de trabalho local;
- arrecadação municipal;
- infra-estrutura rodoviária;
- uso racional dos recursos hídricos.

A construção do índice de impacto positivo de uma alternativa desenvolve-se em duas etapas:

- Composição dos índices de impacto positivo da alternativa relativo a cada elemento socioeconômico selecionado para a avaliação (**IAe**)
- Composição do índice de impacto positivo total da alternativa (**IAp**)

No SINV, já se encontram implementados os procedimentos para atribuição de graus de impacto por subárea para cada um desses aspectos, a partir do preenchimento dos dados requeridos pela análise. Os indicadores de impacto, os elementos de avaliação e os critérios de avaliação para cada aspecto já estão considerados no SINV, bem como a composição do índice de impacto positivo da alternativa por aspecto socioeconômico e do índice impacto positivo total da alternativa.

b.1) Composição dos índices de impacto positivo da alternativa por aspecto socioeconômico (**IAe**)

A análise dos impactos positivos para cada um dos aspectos socioeconômicos selecionados é iniciada com a avaliação do impacto do conjunto de aproveitamentos, que compõem cada alternativa, sobre cada subárea. Deve ser atribuído de um grau de impacto por subárea, utilizando os indicadores de impacto para cada aspecto sugeridos pela metodologia descrita no capítulo 5 do Manual de Inventário Hidrelétrico (MME, 2007).

Como as avaliações dos impactos positivos estão referenciadas a determinados aspectos socioeconômicos considerados na caracterização e avaliação dos componentes-síntese utilizados para a análise dos impactos negativos, as subáreas estabelecidas para os componentes Modos de Vida, Organização Territorial e Base Econômica podem servir de base para essas avaliações. Entretanto, recomenda-se que seja feita uma análise criteriosa das sub-unidades de análise mais adequadas para tais avaliações. Os pesos relativos entre as subáreas dos componentes-síntese a serem tomados como referência devem necessariamente ser revistos.

O índice de impacto positivo da alternativa para cada aspecto socioeconômico (IAe) é resultante da soma ponderada dos graus de impacto por subárea.

$$IAe = \sum I_{SAei} \times P_{SAei}$$

Onde:

I_{SAei} – índice de impacto positivo sobre aspecto socioeconômico relativo ao conjunto de aproveitamentos que afetam a subárea i ; e

P_{SAei} – fator de ponderação relativo a cada subárea i , para o aspecto socioeconômico em análise.

b.2) Construção do **índice de impacto positivo total da alternativa** pela soma ponderada dos índices relativos a cada elemento considerado na análise (**IAp**).

Este índice deve expressar os impactos socioambientais positivos causados pela alternativa sobre todos os aspectos socioeconômicos considerados na avaliação. É obtido pela soma ponderada dos índices de impacto positivo da alternativa sobre cada aspecto, calculado anteriormente (IAe).

$$IAp = \sum IAei \times Pei$$

Onde:

Pei – fator de ponderação relativo a cada elemento.

Os pesos utilizados devem refletir a importância relativa entre os aspectos, considerando o aporte de interferências favoráveis e as características da região.

2.7.10 Consideração do impacto referente a complementação energética das Alternativas

Comparando-se as definições dos índices ICB e IAN, pode-se observar que no cálculo da eficiência econômico-energética o índice ICB considera a parcela de energia firme que seria obtida por outras fontes ou pela fonte hidroelétrica fora da bacia em estudo necessária para que todas as alternativas atingissem o montante de energia firme associado a alternativa que produz a maior energia firme ($\Delta Ef^* - \Delta Efa$). Esta parcela de energia firme é valorada pelo custo unitário de referência (CUR). Por outro lado, o índice de impacto socioambiental negativo considera apenas os impactos negativos oriundos da instalação dos aproveitamentos hidroelétricos na bacia associados à energia firme produzida por cada alternativa. Os impactos negativos referentes a parcela de energia firme que seria obtida por outras fontes ou pela fonte hidroelétrica fora da bacia em estudo ($\Delta Ef^* - \Delta Efa$) não é considerado.

É importante que o impacto desta parcela de energia seja considerado para explicitar aos tomadores de decisão e a sociedade que abrir mão de um potencial hidrelétrico eficiente sob o ponto de vista econômico-energético também produzirá impactos, uma vez que esta energia deixará de ser gerada dentro da bacia para ser gerada por outras hidrelétricas em outras bacias ou por outra fonte de energia, que pode vir a ser mais impactante do que a geração hidrelétrica.

CEPEL (2012) desenvolveu uma metodologia para incorporação do impacto socioambiental negativo associado ao montante de energia que deixa de ser gerada na bacia em estudo por cada alternativa de divisão de quedas ($\Delta Ef^* - \Delta Efa$), e que consistiu em valorar este montante de energia firme pelo índice representativo do impacto socioambiental negativo da expansão da geração (IAEXP), resultando no índice representativo do impacto socioambiental negativo da energia firme complementar de cada alternativa de divisão de quedas, denominado IACE.

$$IACE_a = \frac{(\Delta Ef^* - \Delta Efa) \times IAEXP}{\Delta Ef^*}$$

O índice IACE consiste, portanto, no produto do montante de energia que deixa de ser gerada na bacia em estudo por cada alternativa de divisão de queda ($\Delta Ef^* - \Delta Efa$) pelo índice de impacto socioambiental negativo da expansão da geração (IAEXP), dividido pelo maior montante de energia firme produzido pelas alternativas de divisão de queda da bacia em estudo (ΔEf^*). A divisão pelo ΔEf^* tem por objetivo tornar o IACE um índice adimensional, assim como os demais índices de impacto socioambiental e o ICB quando dividido pelo CUR. Adotar o ΔEf^* como quociente para tornar o IACE

um índice adimensional faz com que o valor do IACE_a seja igual ao valor do IAEXP, sendo “a” uma alternativa que considerasse a opção de não explorar o potencial hidroelétrico da bacia ($\Delta E_{fa} = 0$) e gerar fora da bacia (ou por outra fonte) o montante equivalente a produção da alternativa com maior energia firme do estudo de inventário.

Para a incorporação do Impacto da Energia Complementar na análise multiobjetivo dos Estudos Preliminares e Finais, CEPEL (2012) propôs que fosse criado um índice de impacto socioambiental negativo modificado (IA*), definido como a combinação linear entre o IACE e IAN, através da média ponderada dos dois índices de impacto socioambiental negativo, conforme equação abaixo.

$$IA_a^* = p_{IAN} \times IAN_a + p_{IACE} \times IACE_a$$

$$\text{Sendo: } p_{IAN} + p_{IACE} = 1 \quad p_{IAN} \geq 0 \quad p_{IACE} \geq 0$$

Onde:

p_{IAN} - peso que reflete a importância relativa do impacto socioambiental negativo causado pela exploração do potencial hidroelétrico na bacia; e

p_{IACE} - peso que reflete a importância relativa do impacto socioambiental negativo causado pela produção de energia elétrica fora da bacia.

Como sugestão de pesos, CEPEL (2012) indica que sejam proporcionais as energias firmes produzidas na bacia e fora dela, conforme equação abaixo:

$$IA_a^* = \frac{IAN_a \times \Delta E_{fa} + (\Delta E_{f^*} - \Delta E_{fa}) \times IAEXP}{\Delta E_{f^*}}$$

A alteração da análise multiobjetivo nos Estudos Preliminares e Finais consiste apenas em substituir o Índice de impacto socioambiental negativo na bacia (IAN_a) pelo Índice de impacto socioambiental modificado (IA_a*) que considera o impacto socioambiental negativo associado a energia firme complementar.

Salienta-se que esta metodologia não faz parte do Manual de Inventário edição 2007 e, portanto, a sua consideração é opcional e fica a cargo do usuário. A partir da versão 6.2, o SINV permite que tal impacto seja considerado com o intuito de enriquecer a análise da escolha da melhor alternativa de divisão de quedas.

2.8 CRITÉRIOS PARA ESCOLHA DE ALTERNATIVA

A seleção de Alternativas é feita tendo como critério básico a maximização da eficiência econômico-energética, em conjunto com a minimização dos impactos socioambientais negativos, considerando-se adicionalmente os impactos socioambientais positivos oriundos da implantação dos aproveitamentos hidroelétricos na bacia. Como, em geral, a maximização da eficiência econômico-energética conflita com a minimização dos impactos socioambientais, no processo de comparação e seleção de alternativas estes aspectos são considerados dentro de uma abordagem multiobjetivo.

2.8.1 Estudos Preliminares

Nos Estudos Preliminares a comparação e seleção de alternativas têm como objetivo a eliminação daquelas alternativas do conjunto Otimizadas Preliminares que se apresentam não-competitivas, tanto sob o ponto de vista da eficiência econômico-energética como sob o ponto de vista dos impactos socioambientais. Para esta comparação deve-se tomar como base o índice custo/benefício energético (item 2.6.7) e o índice socioambiental negativo (itens 2.7.7 e 2.7.8), calculados para cada alternativa, sem, entretanto, agregá-los, evitando-se estabelecer a importância relativa dos dois objetivos. A seleção é feita eliminando-se alternativas de baixo desempenho sob qualquer dos dois pontos de vistas e identificação de alternativas para as quais não existe outra com índices custo/benefício energético e socioambiental negativo simultaneamente inferiores (ver item 3.11).

2.8.2 Estudos Finais

Nos Estudos Finais a comparação e seleção de alternativas tem por objetivo identificar uma alternativa que será utilizada nos estudos subseqüentes da cadeia de planejamento do setor.

Inicialmente, as alternativas devem ser comparadas através de uma representação gráfica onde, assim como nos Estudos Preliminares, em um dos eixos estará representado o índice custo/benefício energético e no outro o índice de impacto socioambiental negativo, devendo a escolha da melhor alternativa ser feita entre aquelas representadas por pontos próximos à região inferior esquerda do gráfico.

Para esta fase, dentro da abordagem multiobjetivo, propõe-se como critério de hierarquização das alternativas um **índice de preferência, I**, obtido pela soma ponderada dos índices de custo/benefício energético (ICB) e de impacto socioambiental negativo (IA), tomando-se o cuidado de antes padronizar o índice custo/benefício energético dividindo-o pelo custo unitário de referência, CUR.

$$I = p_{cb} \times \frac{ICB}{CUR} + p_a \times IA$$

Onde: $p_{cb} + p_a = 1$

$p_{cb} \geq 0$ e $p_a \geq 0$

A definição dos pesos p_{cb} e p_{an} deve considerar, além da opinião dos especialistas envolvidos diretamente nos estudos, as contribuições e opiniões manifestadas na reunião técnica realizada ao final dos Estudos Preliminares, de modo a refletir o contexto em que a análise se insere e a época em que os estudos se realizam.

Para a escolha final da alternativa de divisão de queda propõe-se uma análise adicional incorporando-se à hierarquia anterior os impactos socioambientais positivos para a área do estudo representados pelo índice de impactos socioambientais positivos, IAp.

Quanto mais próximo do valor **um** estiver este índice, melhor a situação da alternativa. No caso dos índices de custo/benefício e socioambiental negativo, a melhor situação tem sentido inverso (melhor quanto mais próxima de zero). Assim, para a agregação de IAp com o índice de preferência I torna-se necessário utilizar seu complemento na escala, ou seja $(1 - IAp)$. O **índice de preferência modificado I'** é calculado por:

$$I' = (1 - p_{ap}) \cdot I + p_{ap} (1 - IAp)$$

Sendo: $0 \leq p_{ap} \leq 1$

p_{ap} – peso que reflete a importância relativa dos impactos socioambientais positivos;

IAp – índice de impacto socioambiental positivo.

A definição do peso p_{ap} deve seguir o procedimento sugerido para a definição dos pesos p_{cb} e p_{an} . Considerando que a escolha da melhor alternativa envolve três objetivos e que o objetivo de maximização dos impactos positivos tem caráter complementar aos outros dois, sugere-se que este peso (p_{ap}) não ultrapasse o valor de 0,25.

Devem ser realizadas e apresentadas análises de sensibilidade para os valores dos pesos utilizados (p_{cb} , p_{an} , p_{ap}).

3. FUNÇÕES EXECUTADAS PELO SIN V

O sistema SIN V executa as seguintes funções:

Geração de alternativas

Geração automática de um conjunto de Alternativas de Divisão de Queda.

Energia Firme

Dimensionamento energético da potência instalada dos aproveitamentos de uma Alternativa de Divisão de Queda.

Otimização Volume Útil

Otimização dos volumes úteis dos aproveitamentos de uma Alternativa de Divisão de Queda.

Dimensionamento Energético

Dimensionamento energético de todos os aproveitamentos da Lista de Projetos, considerando um conjunto de Alternativas de Divisão de Queda.

Verificação Reenchimento Volume Útil

Verifica se é possível reencher o volume do útil do reservatório em até três anos após o período crítico.

Elimina

Eliminação de projetos ou grupo de projetos não-competitivos de uma Alternativa de Divisão de Queda.

Avaliação Econômico Energética

Avaliação de conjunto de Alternativas de Divisão de Queda de acordo com o índice custo-benefício energético.

Ordena

Definição da ordem de construção dos aproveitamentos de uma alternativa de acordo com o custo incremental.

Cálculo Período Crítico

Cálculo do período crítico da bacia estudada.

Cálculo do Impacto Socioambiental Negativo

Cálculo de índices de impacto socioambiental negativo de uma Alternativa de Divisão de Queda em cada componente-síntese e sobre o sistema ambiental na área de estudo.

Cálculo do Impacto Socioambiental Positivo

Cálculo de índices de impacto socioambiental positivo de uma Alternativa de Divisão de Queda em cada aspecto e sobre o sistema ambiental na área de estudo.

Análise Multiobjetivo Preliminar

Escolha dentre as alternativas no conjunto Otimizadas Preliminares daquelas que devem passar para a fase dos Estudos Finais.

Análise Multiobjetivo Final

Hierarquização das alternativas no conjunto Otimizadas Finais de acordo como o índice de preferência modificado, I' , obtido pela soma ponderada dos índices de preferência e socioambiental positivo. O índice de preferência é obtido pela soma ponderada dos índices custo/benefício e socioambiental negativo.

A seguir será descrita a metodologia empregada em cada um dessas funções.

3.1 GERAÇÃO DE ALTERNATIVAS

O objetivo desta função é facilitar a entrada de dados do usuário gerando automaticamente um conjunto de Alternativas de Divisão de Quedas. Para tanto, esta função leva em consideração a disposição dos locais barráveis na topologia criada pelo usuário, as cotas máxima e do canal de fuga de cada projeto, bem como um limite aceitável de afogamento do canal de fuga, que pode ou não ser definido pelo usuário. Esta geração tem como premissa incluir o maior número possível de projetos

em cada alternativa, uma vez que o objetivo é aproveitar ao máximo o potencial hidrelétrico da bacia. Após a geração, é feito o cálculo simplificado (conforme item 3.2.1) da energia firme de cada uma dessas Alternativas de Divisão de Quedas. Como resultado, a função apresenta as Alternativas de Divisão de Quedas geradas, sendo elas exibidas em ordem decrescente de energia firme, podendo o usuário selecionar aquelas que serão consideradas no conjunto de alternativas “originais preliminares”.

3.2 ENERGIA FIRME

A função Energia Firme dimensiona as potências instaladas dos aproveitamentos de uma alternativa de divisão de queda utilizando o critério da energia firme e fator de capacidade de referência descrito no item 2.6.4. A função considera os níveis mínimos de operação dos reservatórios e quedas de referência definidas pelo usuário. Para os Estudos Preliminares, a função utiliza procedimentos aproximados para uma avaliação preliminar da energia firme de cada local. Estes procedimentos reunidos no ítem 3.2.1 sobre a denominação de Cálculo Simplificado têm como base níveis máximos e mínimos de operação dos reservatórios, níveis médios dos canais de fuga e, em relação ao conjunto turbina-gerador, apenas coeficientes de rendimentos e tipos de turbinas. Supõem ainda o aproveitamento energético de toda a produção hídrica natural da bacia durante o período crítico do sistema de referência, descontando-se somente as perdas por evaporação nos reservatórios. Visando avaliar se haverá necessidade de considerar o cenário de usos múltiplos já na fase de Estudos Preliminares, deve-se identificar se na bacia em estudo os usos múltiplos da água sugerem a alteração significativa na definição e/ou na avaliação das alternativas de divisão de queda (MME, 2007). Esta identificação é feita na etapa do Diagnóstico dos usos múltiplos da água. Se a bacia em estudo apresentar algum uso muito importante para a definição e comparação das alternativas, o cenário de usos múltiplos poderá ser considerado já nos Estudos Preliminares. Salienta-se que a formulação para os Estudos Preliminares (item 3.2.1) considera o caso mais complexo, onde os usos múltiplos são considerados, a simplificação é automática.

Entretanto, na operação real do sistema as limitações dos conjuntos turbina-gerador e das capacidades de armazenamento dos projetos implicarão em vertimentos não aproveitáveis energeticamente. Desta forma, os valores de energias firmes, quedas líquidas médias e correspondentes potências instaladas, calculados através do Cálculo Simplificado, são preliminares devendo-se repetir as avaliações através dos estudos de simulação conforme descritos no item 3.2.2. Por outro lado, como na fase de Estudos Preliminares de um Estudo de Inventário Hidroelétrico o nível de informações sobre a hidrologia e topografia da bacia inventariada são em geral muito preliminares, pode-se considerar nesta fase apenas o uso do Cálculo Simplificado

3.2.1 Cálculo Simplificado

A função Energia Firme possui uma opção de avaliação energética através do Cálculo Simplificado. Nesta opção, a avaliação é feita tendo como base apenas os valores médios de afluições líquidas durante o período crítico do sistema de referência e dados referentes a níveis e volumes armazenados de cada aproveitamento. Em relação às instalações eletromecânicas é preciso informar apenas coeficientes de rendimentos e o tipo de turbina mais adequado. A tabela 4 fornece os dados de projeto necessários para o Cálculo Simplificado.

Tabela 4 - Dados de Projeto Necessários para Avaliação Energética por Cálculo Simplificado.

| Níveis e volumes |
|---|
| <p>Curva Volume x Cota (em milhões de m³ x m)</p> <p>obs: o programa utiliza a curva do local barrável do aproveitamento</p> |
| <p>Curva Área x Cota (em milhões de m² x m)</p> <p>obs: o programa utiliza a curva do local barrável do aproveitamento</p> |
| <p>Nível d'água máximo no reservatório (em m)</p> |
| <p>Volumes de Espera para cada mês do ano (em milhões de metros cúbicos)</p> <p>obs: no SINV o usuário fornece um volume de espera máximo para cada aproveitamento e uma curva mensal em % deste valor, válida para todos os aproveitamentos do estudo.</p> |
| <p>Nível d'água mínimo no reservatório (em m)</p> <p>obs: caso o usuário forneça um valor negativo o programa utilizará o valor correspondente a depleção de 1/3 da queda bruta máxima no local.</p> |
| <p>Nível D'Água do Canal de Fuga (em metros)</p> <p>obs: deve-se considerar o nível no canal de fuga correspondente à uma vazão 10% maior que a vazão natural média ao longo do período crítico do sistema de referência</p> |
| Instalações Eletro-mecânicas |
| <p>Coeficiente de perdas hidráulicas (em %)</p> <p>obs: não incluídas as perdas nas turbinas.</p> |
| <p>Rendimento Global do Conjunto Turbina-Gerador (em %)</p> |
| <p>Tipo de Turbina mais adequado (Kaplan, Francis ou Pelton)</p> |

Parâmetros Calculados

No cálculo simplificado o módulo Energia Firme calcula para cada aproveitamento, os seguintes parâmetros:

Nível D'Água Máximo Normal (em metros)

O programa considera como nível d'água máximo normal do reservatório ($CTMAX_i$) o nível d'água máximo do reservatório fornecido pelo usuário para o aproveitamento, descontando o menor dos volumes de espera alocados a cada mês no aproveitamento.

Nível D'Água Normal de Jusante (em metros)

$$CTJUS_i = \max (CFMED_i, CTMAXJ_i)$$

Onde:

$CFMED_i$ - Nível d'água no canal de fuga (fornecido pelo usuário, em metros); e

$CTMAXJ_i$ - Nível d'água máximo normal do reservatório de jusante da casa de força.

Queda Bruta Máxima (em metros)

$$HBMAX_i = CTMAX_i - CTJUS_i$$

Queda Líquida Máxima (em metros)

$$HLMAX_i = HBMAX_i \cdot (1 - PERDA_i)$$

Onde:

$PERDA_i$ - Coeficiente de perdas hidráulicas nas tubulações exclusive a perda na turbina (dado fornecido pelo usuário).

Volume Útil (em milhões de m³)

$$VU_i = VMAX_i - VMIN_i$$

Onde:

$VMAX_i$ - Volume máximo (volume em milhões de m³, obtido da curva cota x volume a partir de $CTMAX_i$); e

$VMIN_i$ - Volume mínimo (volume em milhões de m³, obtido da curva cota x volume a partir do nível d'água mínimo no reservatório do aproveitamento fornecido pelo usuário em m).

Nível d'Água Médio do Reservatório (em metros)

O nível d'água médio do reservatório ($CTMED_i$) é o obtido na curva volume x cota para o volume dado pela expressão:

$$VM_i = VMAX_i - VESM_i - \frac{0,5(VU_i - VESM_i)}{(VU_i - VESM_i) + 0,5 \sum_{j \in M_i} (VU_j - VESM_j)} \cdot (VU_i - VESM_i)$$

Onde:

M_i - Conjunto de usinas a montante do aproveitamento I . Quando a alternativa analisada inclui projetos de derivação, considera-se a topologia resultante das derivações na definição de M_i ; e

$VESM_i$ - média ao longo do período crítico dos volumes de espera alocados no aproveitamento i .

Queda Bruta Média (em metros)

$$HBMED_i = CTMED_i - CTJUS_i$$

Queda Líquida Média (em metros)

$$HLMED_i = (1 - PERDA_i) \cdot HBMED_i$$

Nível D'Água Médio de Esvaziamento do Reservatório (em metros)

O nível d'água médio de esvaziamento do reservatório ($CTMESV_i$) é o obtido na curva volume x cota para o volume dado pela expressão:

$$VESV_i = VMIN_i + \frac{VU_i - VESP_i}{2}$$

Onde:

$VESP_i$ - volume de espera alocado no reservatório i no mês inicial do período crítico.

Queda Líquida Média de Esvaziamento (em metros)

$$HLMESV_i = (CTMESV_i - CTJUS_i) \cdot (1 - PERDA_i)$$

Descarga Bruta Média no Período Crítico (em m³/seg)

$$QBMED_i = QPCS_i + \frac{\left[VU_i - VESP_i + \sum_{j \in M_i} (VU_j - VESP_j) \right]}{SEGPS} - QIRRIG_i - QRET_i - QNA_i$$

Onde:

$QPCS_i$ - Média ao longo do período crítico da vazão natural no posto correspondente ao aproveitamento i (em m³/seg.);

$QIRRIG_i$ - Média ao longo do período crítico do total de retiradas d'água para irrigação até o posto correspondente ao aproveitamento i (em $m^3/seg.$);

$QRET_i$ - Média ao longo do período crítico do total de retiradas d'água para outros usos d'água até o posto correspondente ao aproveitamento i (em $m^3/seg.$);

QNA_i - Média ao longo do período crítico das defluências feitas no curso natural para garantia da vazão mínima, quando se tratar de aproveitamento de derivação, correspondente ao aproveitamento i (em $m^3/seg.$); e

$SEGPS$ = Número de segundos do período crítico do sistema.

Nota 1: No cálculo de QNA_i , o programa considera como defluência para o curso natural, a cada mês do período crítico, o menor valor entre a vazão natural no posto correspondente ao aproveitamento, descontada do total de retiradas d'água para irrigação e outros usos, e a vazão mínima do local barrável.

Nota 2: Quando a alternativa em estudo incorporar projetos de derivação, as vazões naturais e as retiradas d'água são alteradas para refletir a topologia resultante, admitindo-se que não ocorram vertimentos, de acordo com a filosofia do Cálculo Simplificado, mas considerando-se as defluências de garantia de vazão mínima no curso natural conforme a nota 1 acima.

Descarga Líquida Média no Período Crítico (em m^3/seg)

$$QLMED_i = QBMED_i - \left(\frac{0,001 \sum_{j \in M_i} EVAP \cdot AMED_j}{SEGM} \right)$$

Onde:

$EVAP$ - Média ao longo do período crítico dos coeficientes de evaporação média mensal (em mm/mês);

$AMED_i$ - Área (em km^2), correspondente ao nível d'água médio do reservatório; e

$SEGM$ - Número médio de segundos nos meses do período crítico.

Obs.: No Cálculo Simplificado também calcula-se a descarga média de longo termo ($QMLT_i$) tomada como a média de todas as vazões mensais do posto correspondente ao aproveitamento i existentes no arquivo de vazões históricas.

Descarga Média de Esvaziamento do Reservatório (em m^3/seg)

$$QESV_i = \frac{VU_i - VESP_i}{SEGPS}$$

Energia Firme (em MW-médios)

$$EF_i = 0,00981 \cdot REND_i \cdot [(QLMED_i - QESV_i) \cdot HLMED_i + QESV_i \cdot HLMESV_i]$$

Onde:

$REND_i$ - Rendimento global do conjunto turbina-gerador (fornecido pelo usuário).

Obs.: A consideração em separado das descargas e quedas líquidas médias de esvaziamento, apesar de não aparecer nas fórmulas indicadas no Manual de Inventário Hidroelétrico, foi incluída no programa por fornecer uma precisão adicional.

Potência de Instalada Recomendada (em MW)

$$PINST_i = \frac{EF_i}{FCAPS}$$

Onde:

$PINST_i$ - potência instalada recomendada para o aproveitamento i , em MW;

EF_i - Energia firme do aproveitamento i ; e

$FCAPS$ - Fator de capacidade de referência (fornecido pelo usuário).

3.2.2 Cálculo por Simulação

A função Energia Firme possui uma opção de avaliação energética através de simulação de operação de sistemas de usinas hidroelétricas. A opção não inclui a iteração de potência instalada conforme implementado na quarta fase da função Dimensionamento Energético (item 3.4).

Processo de Simulações Iterativas para Obtenção da Energia Firme

Inicialmente a estimativa de energia firme obtida através do Cálculo Simplificado (item 3.2.1) é utilizada como um mercado objetivo constante ao longo de todo o período crítico do sistema de referência. A rotina de simulação opera o sistema segundo regras pré-fixadas tentando atender a este mercado. A energia gerada a cada mês é acumulada, podendo ocorrer déficits ou excessos em relação ao mercado objetivo (no caso de haver vertimentos, o sistema pode gerar em excesso). A energia média gerada ao longo da simulação é considerada como a contribuição em energia firme do sistema simulado se a energia armazenada residual (EAR) ao fim da simulação for desprezível. Pode ocorrer, entretanto, que ainda exista uma energia armazenada residual significativa. Na tentativa de se aproveitar esta energia armazenada residual dá-se um acréscimo ao mercado objetivo de valor igual a EAR/n^o meses do período crítico e inicia-se uma nova simulação. Este acréscimo pode não ser suficiente para eliminar o armazenamento residual (casos onde ocorrem vertimento ou esgotamento

total dos reservatórios em algum mês do período crítico). Além disto, pode ser que a energia média gerada, ao invés de aumentar, diminua, pois, a partir de um certo ponto a perda de geração por deplecionamento excessivo dos reservatórios anula o aproveitamento da EAR.

A cada iteração calcula-se a energia média gerada, a EAR e o acréscimo a ser dado no mercado objetivo. O processo pára quando a EAR é desprezível, a energia média gerada diminui, ou um número máximo de iterações é atingido. A maior energia média gerada obtida nas iterações é considerada a contribuição em energia firme da alternativa simulada. Além da energia firme da alternativa como um todo, obtém-se também como resultado da simulação para cada aproveitamento energias firme e vertida, queda líquida máxima (diferença entre CTMAX e a média do nível d'água no canal de fuga), queda líquida média (média das quedas líquidas de início de mês) e potência instalada recomendada.

A opção de simulação da função Energia Firme também pode ser utilizada como um simples simulador, inibindo-se o processo iterativo de redução de energia armazenada residual. Neste caso pode-se especificar o mercado objetivo ou fazer uso da estimativa de energia firme obtida através do Cálculo Simplificado.

Regra de Operação

A operação do sistema é feita mês a mês, por todo o período crítico do sistema de referência. A cada mês, dados os volumes armazenados nos reservatórios no início do mês (estado do sistema) e as vazões afluentes (descontadas das retiradas para outros usos d'água), o programa procura determinar as vazões turbinadas e vertidas em cada aproveitamento (e as defluências no curso natural para garantia de vazão mínima no caso de derivações), tendo por objetivo atender o mercado mensal de energia, evitando-se vertimentos e atendendo-se às restrições físicas e operativas do sistema.

Faixas Operativas e Prioridades de Enchimento e Esvaziamento

Como a operação de um mês “não vê” a operação do sistema ao longo de todo o período crítico, introduz-se um balizamento na operação mensal através das faixas operativas e das prioridades de enchimento e esvaziamento dos reservatórios. O programa considera para cada reservatório o número de faixas operativas informado pelo usuário no Sistema de Referência (valor compreendido entre 4 e 10), contendo cada uma parcela do volume útil referente ao número de faixas escolhido. Em relação à ordem de prioridades de esvaziamento, o programa considera primeiro os reservatórios de cabeceira. A seguir na ordem de prioridades de esvaziamento coloca-se os reservatórios com apenas um reservatório a montante, depois os com apenas dois reservatórios à montante, e assim por diante. O processo continua até que se tenha definido a prioridade de esvaziamento de todos os reservatórios

do sistema. A ordem de prioridades de enchimento é a ordem inversa da ordem de prioridades de esvaziamento.

Quando a alternativa inclui projetos de derivação, considera-se nessa ordenação de prioridades a topologia resultante das derivações.

Processo Iterativo de Simulação

A simulação da operação de um mês é feita através de um processo iterativo formado por três passos principais: o cálculo da produção de energia a partir de metas de volumes finais (subrotina PWRGEN), o balanço entre a energia produzida e o mercado a ser atendido, e a correção das metas conforme o resultado do balanço (subrotinas FILL e DRAFT). O processo é inicializado tomando-se como meta volumes finais iguais aos volumes iniciais, forçando-se a seguir o uso da subrotina de enchimento dos reservatórios. O processo termina sempre que uma das seguintes condições ocorre:

- a diferença entre o mercado e a produção de energia é menor que um critério de convergência
- existe déficit na produção de energia mas as usinas estão com os reservatórios vazios ou turbinando o máximo,
- existe excesso na produção de energia mas as usinas estão com os reservatórios cheios ou turbinando o mínimo.
- um número máximo de iterações foi atingido

Subrotina PWRGEN

Conhecidos os volumes no início do mês e as metas de volumes no fim do mês fixadas pela subrotina FILL ou pela subrotina DRAFT, a subrotina PWRGEN calcula para cada usina j do sistema a vazão turbinada (qt_j), a vazão vertida (qv_j), a defluência no curso natural para vazão mínima (qna_j) no caso de derivações, e a produção de energia (en_j). A subrotina só altera as metas de volumes ao final do mês se alguma restrição físico-operativa for violada.

A subrotina PWRGEN processa os aproveitamentos da alternativa de montante para jusante executando para cada um os seguintes passos.

1) Cálculo das perdas por evaporação

As perdas por evaporação são obtidas aplicando-se o coeficiente de evaporação do mês (dado fornecido pelo usuário) à área inundada correspondente ao volume obtido pela média entre os volumes iniciais e finais.

2) Cálculo da defluência no curso natural para vazão mínima

No caso de derivação, obtêm-se a defluência no curso natural como o mínimo entre a afluência natural ao aproveitamento, descontadas as retiradas a montante, e a vazão mínima defluente do local barrável (dado fornecido pelo usuário)

3) Cálculo da vazão defluente total (turbinada mais vertida)

Por uma equação de balanço entre os volumes finais e iniciais, perdas por evaporação, e a afluência ao aproveitamento obtém-se um primeiro valor para a defluência. Caso este valor seja menor que a vazão mínima defluente do aproveitamento (dado fornecido pelo usuário) ou, no caso de derivação, a defluência no curso natural calculada no item 2, o volume final é alterado até o limite do volume mínimo para atender este valor mínimo. A seguir verifica-se se o novo balanço resulta em defluência negativa devido à combinação entre perdas de evaporação superiores à afluência e a necessidade de se manter volume mínimo. Neste caso, a defluência é zerada, a evaporação restringida, e o volume final é igualado ao volume mínimo. Neste passo verifica-se também se a meta de volume final atende o volume de espera indicado para o reservatório. Caso não atenda a meta é alterada.

4) Cálculo da vazão turbinada e da energia gerada:

O programa procura turbinar toda a vazão defluente calculada no passo anterior, descontada da defluência no curso natural para a vazão mínima no caso de derivação, mas considera os limites de engolimento devido à turbina e ao gerador.

O limite de engolimento devido à turbina (q_{tur_j}) depende da situação de queda, sendo calculado na subrotina PWRGEN, através de:

$$q_{tur_j} = q^*_{j} (h_j / (h^*_{j} / (1 - \rho_j)))^{0.5} \quad \text{se turbina Francis ou Pelton}$$

$$q_{tur_j} = q^*_{j} \quad \text{se turbina Kaplan ou Bulbo}$$

Onde:

h^*_{j} - é a queda de referência da turbina do aproveitamento j (dado fornecido pelo usuário);

ρ_j - é o coeficiente de perdas hidráulicas em percentagem (dado fornecido pelo usuário); e

q^*_{j} - engolimento máximo da turbina do aproveitamento j na situação de queda de referência, em m^3/s .

$$q^*_{j} = (1-TEIF_j) \times (1-IP_j) \times PINST_j / (9.81 \times 10^{-6} \gamma_j h^*_{j})$$

h_j - é a situação de queda no aproveitamento j para o mês sendo simulado;

γ_j - é o rendimento do conjunto turbina-gerador, em percentagem (dado fornecido pelo usuário);

$TEIF_j$ - é a taxa de indisponibilidade forçada do aproveitamento j ; e

IP_j - é a taxa de indisponibilidade forçada.

A situação de queda do mês no aproveitamento é obtida através de:

$$h_j = NAM_j - CJUS_j$$

Onde:

NAM_j - é a média dos níveis d'água no reservatório do aproveitamento j no início e no final do mês; e

$CJUS_j$ - é o nível d'água de jusante do reservatório j , considerado como:

$$CJUS_j = \max(CF(vd_j) , NAM_{jus_j})$$

Onde:

$CF_j(vd_j)$ - é o nível na curva-chave do aproveitamento para a vazão no canal de fuga. Quando não é fornecida curva-chave usa-se o nível médio do canal de fuga ($CFMED_j$) fornecido pelo usuário. Quando é fornecida a curva-chave do canal de fuga, no caso de aproveitamentos sem derivação a vazão no canal de fuga é igual a vazão defluente total calculada no passo 3. No caso de projetos com derivação, a vazão no canal de fuga é apenas a vazão turbinada, desconhecida neste passo. Para estes casos, o programa faz 3 iterações dos passos 1 a 5. Na primeira iteração, considera-se para efeito de cálculo da situação de queda a vazão defluente total calculada no passo 3 descontada da defluência no curso natural para a vazão mínima. Nos outros dois passos desconta-se a vazão vertida calculada no passo 5 da iteração anterior; e

NAM_{jus_j} - é a média dos níveis d'água no reservatório de jusante da casa de força no início e no final do mês.

O limite de turbinamento devido ao gerador também depende da queda e é calculado pela subrotina PWRGEN como:

$$qgen_j = PINST_j / (9.81 \times 10^{-6} (1 - \rho_j) \gamma_j h_j)$$

Onde:

$PINST_j$ - é a potência instalada, em Mw (dado fornecido pelo usuário).

A energia gerada pela usina (en_j) é obtida por:

$$en_j = 9.81 \times 10^{-6} (1 - \rho_j) \gamma_j h_j qt_j$$

5) Cálculo da vazão vertida:

A vazão vertida é dada pela diferença entre as vazões defluente total e turbinada obtidas nos passos anteriores.

6) Verificação de possibilidade de armazenamento para a vazão vertida

Caso a meta de volume final do aproveitamento seja inferior ao seu volume máximo menos o seu volume de espera de fim de mês e se tenha obtido no passo 5 vazão vertida não nula, o programa procura armazenar no reservatório este volume vertido alterando-se o volume final para o volume máximo menos o volume de espera de fim de mês. Como uma alteração de volume final altera as perdas por evaporação e a situação de queda do mês, os passos anteriores devem ser retomados sempre que o volume final é alterado neste passo. A cada chamada da subrotina PWRGEN são feitas no máximo duas verificações de possibilidade de armazenamento de vazão vertida para cada aproveitamento.

7) Atualização da vazão afluente ao aproveitamento de jusante

Obtidas as vazões que passarão pela casa de força (vazão turbinada) e pelos vertedouros (vazão vertida e de garantia de vazão mínima no caso de derivações), estes valores são adicionados às vazões afluentes ao respectivo aproveitamento imediatamente a jusante.

Nota: O passo 6 não é executado para os aproveitamentos considerados como “liberados para vertimento” (ver discussão da subrotina DRAFT)

Subrotina FILL

A subrotina FILL comanda a operação de enchimento. O critério da operação consiste em percorrer os reservatórios numa certa seqüência, determinada a partir do nível de armazenamento e da prioridade de enchimento. O critério procura primeiro equilibrar os volumes dos reservatórios numa mesma faixa e dentro de cada faixa, percorre-se os reservatórios de acordo com sua prioridade de enchimento.

Escolhido um reservatório j , a rotina calcula 3 vazões limites:

$qlim_j$ - maior vazão que pode ser retida na usina j , garantindo-se a vazão mínima em j e em todas as usinas da cascata a jusante de j . No caso de projetos de derivação $qlim_j$ é considerada como igual ao vertimento, quando este estiver ocorrendo, e igual ao turbinamento no caso contrário.

$qfaix_j$ - vazão que, retida na usina j , eleva o nível do reservatório ao limite superior da faixa em que se encontra. Se existe volume de espera para ser alocado ao final do mês no reservatório j , considera-se para $qfaix_j$ elevações do nível do reservatório não superiores ao nível correspondente ao volume de espera

$qdif_j$ - vazão que, retida na usina j , elimina o excesso de geração. É estimada a partir do valor da água no reservatório ($Mw/m^3/s$), obtida considerando-se a topologia resultante de derivações.

A vazão retida na usina j será a maior vazão que não viola nenhum destes limites, ou seja:

$$qdep_j = \min \{ qlim_j, qfaix_j, qdif_j \}$$

A vazão retida na usina é uma vazão a ser subtraída da vazão defluente da usina.

Se $q_{dep_j} = q_{faix_j}$ a rotina atualiza o indicador de faixa do reservatório j a fim de que ele seja novamente escolhido, se a faixa seguinte for percorrida.

Se q_{dep_j} for maior que uma tolerância, o programa considera que o reservatório j teve o seu volume final alterado e atualiza-se as vazões defluentes, turbinadas e vertidas a jusante de j

O processo de enchimento pára quando a soma das diminuições de geração em cada usina eliminar o total do excesso de geração ou quando não há mais enchimentos possíveis no sistema.

Durante todo o processo de enchimento, supõe-se que os valores d'água nos reservatórios se mantenham constante. Trata-se evidentemente de uma aproximação, válida apenas quando as variações nos volumes são pequenas. Se estas variações forem significativas o balanço de energia não será fechado, sendo necessária uma nova iteração.

Subrotina DRAFT

Esta subrotina comanda a operação de deplecionamento. Seu procedimento é análogo ao da rotina FILL, trocando-se as vazões limites e operando conforme a prioridade de esvaziamento fornecida.

Assim, escolhido um reservatório j , a rotina calcula 3 vazões limites:

q_{lim_j} - maior vazão que pode ser liberada na usina j sem exceder a sua capacidade de turbinamento e sem exceder a "capacidade de absorção" de nenhuma a jusante de j (considerando-se a topologia resultante de derivações). A "capacidade de absorção" de uma usina é dada pela soma da vazão que ela ainda pode armazenar com a vazão que ela ainda pode turbinar. O usuário tem a liberdade de considerar algumas usinas no sistema como "liberadas para vertimento". Para estas usinas o programa considera uma "capacidade de absorção" sempre infinita.

q_{faix_j} - vazão que, liberada na usina j , depleciona o nível do reservatório até o limite inferior da faixa em que se encontra. Se existe volume de espera para ser alocado ao final do mês no reservatório j , considera-se para q_{faix_j} a vazão que depleciona o reservatório até o nível correspondente ao volume de espera se este nível for inferior ao limite da faixa em que o reservatório se encontra.

q_{dif_j} - vazão que, liberada na usina j e na sua cascata, elimina o déficit de geração. É estimada a partir do valor da água no reservatório ($Mw/m^3/s$) obtida considerando-se a topologia resultante de derivações.

A vazão liberada na usina j será a maior vazão que não viola nenhum destes limites, ou seja:

$$q_{dep_j} = \min \{ q_{lim_j}, q_{faix_j}, q_{dif_j} \}$$

A vazão liberada na usina é uma vazão a ser somada à vazão turbinada da usina.

Se $q_{dep_j} = q_{faix_j}$ a rotina atualiza o indicador de faixa do reservatório j a fim de que ele seja novamente escolhido, se a faixa seguinte for percorrida.

Se q_{dep_j} for maior que uma tolerância, o programa considera que o reservatório j teve o seu volume final alterado e atualiza-se as vazões defluentes, turbinadas e vertidas a jusante de j

Dados básicos necessários para a simulação

Os dados básicos para a simulação são os seguintes:

Características físicas dos aproveitamentos

Além dos dados de projeto necessários para o cálculo simplificado (ver Tabela 1), deve-se indicar para cada aproveitamento os seguintes dados adicionais:

Potência Instalada (em Mw) - capacidade dos geradores.

Queda de Referência (em m) - queda líquida na qual as turbinas com seus distribuidores totalmente abertos fornecem a potência instalada. Deve-se usar a queda líquida máxima (ver item 2.5.4).

Vazão mínima defluente (em m^3/s) - vazão mínima defluente para manutenção da qualidade d'água e/ou tirantes para navegação

Curva-chave do canal de fuga (em $m \times m^3/s$) - quando não fornecida, o sistema utiliza o nível médio de canal de fuga fornecido pelo usuário.

Coefficientes de Evaporação Mensal (mm/mês)

O programa considera os dados da estação evaporimétrica associada ao local barrável do aproveitamento (ver item 2.1).

Período de Simulação

Conjunto de meses sucessivos do passado para os quais se quer simular o comportamento da alternativa. Normalmente, este período será o período crítico do sistema de referência, em relação ao qual se quer avaliar a energia firme dos diversos aproveitamentos.

Mercado de Energia

Normalmente é igual à energia firme da alternativa obtida pelo cálculo simplificado já descrito. A simulação é feita operando os reservatórios, de modo a tentar que a geração total, mês a mês, seja igual ao mercado informado. Durante a simulação, isto nem sempre será possível. A geração efetivamente alcançada por cada aproveitamento é registrada de maneira que no final da simulação

será possível calcular a geração média total da alternativa. Essa geração média será a nova estimativa da energia firme da alternativa.

Liberação de Vertimento

Em geral a operação do sistema deve evitar vertimentos em todas as usinas do sistema. No entanto quando a alternativa de divisão de queda estudada incorpora aproveitamentos existentes sub-motorizados no meio da cascata, pode-se chegar facilmente a situações em que o mercado de energia não é totalmente atendido num certo mês, apesar de existir ainda água estocada. Esta água só não é liberada devido as limitações de engolimento dos aproveitamentos sub-motorizados (ver descrição da subrotina DRAFT) localizados à jusante do estoque. Para se evitar este estrangulamento deve-se considerar estes aproveitamentos como "liberados para vertimento". Aproveitamentos com derivação são automaticamente considerados pelo programa como **não** liberados para vertimento.

CrITÉrios de Convergência e Número Máximo de Iterações

Na utilização da função Energia Firme o usuário deve fornecer os seguintes parâmetros:

- Tolbal - Percentual do mercado-objetivo considerado como desprezível para a avaliação do balanço mensal de energia
- Litbal - Número máximo de correções de metas de um mês.
- Tolmer - Percentual da energia gerada média considerado como desprezível para avaliação da energia armazenada residual
- Litmer - Número máximo de tentativas de redução da energia armazenada residual.
- Zmerc - Mercado objetivo em Mw no caso de uso da função Energia Firme como simulador, opção mercado fornecido.

3.3 OTIMIZAÇÃO VOLUME ÚTIL

A função Otimização Volume Útil otimiza os volume úteis dos aproveitamentos de uma alternativa de divisão de queda. Aproveitamentos existentes e a fio d'água não são otimizados. Dos restantes, só são otimizados os aproveitamentos escolhidos para otimização pelo usuário. Inicialmente, estabelecem-se em todos os aproveitamentos escolhidos para otimização depleções máximas correspondentes a um terço das quedas brutas máximas, ou ao limite inferior de NA mínimo, quando este for determinante, e determina-se por Cálculo Simplificado ou por Simulação a energia firme da alternativa de divisão de queda. Estabelecido este valor, reduz-se a depleção do último reservatório de jusante, dentre os escolhidos para otimização e recalcula-se a energia firme da alternativa. Este processo é repetido diminuindo-se o volume útil (o usuário escolhe a discretização entre o NA mínimo ou limites inferiores impostos e o NA máximo, tendo como default 1 cm) até que o NA mínimo se

iguale ao NA máximo. Ao final, escolhe-se o "ponto ótimo", ou seja, a opção que resulta na maior energia firme para a alternativa. Fixado o volume útil do último reservatório a jusante, o processo é repetido para o penúltimo reservatório de jusante dentre os escolhidos para otimização e, assim, sucessivamente, até o aproveitamento mais a montante. O processo volta, então, ao último reservatório de jusante para nova iteração. A função Otimização Volume Útil executa três iterações.

3.4 DIMENSIONAMENTO ENERGÉTICO

O dimensionamento energético de um aproveitamento hidroelétrico nos Estudos de Inventário corresponde à definição da depleção máxima, da queda de referência e da potência instalada, ficando a vazão nominal para ser definida em função da potência instalada e da queda de referência. A consideração da energia firme para dimensionamento energético indica a necessidade do uso de simulações da operação do sistema ao longo do período crítico do sistema de referência. Como os resultados de simulações dependem dos parâmetros do dimensionamento energético de todos aproveitamentos sendo simulados, em geral o processo de dimensionamento deve ser iterativo e feito concomitantemente para todos os três parâmetros. Também, como a energia firme de um aproveitamento depende da alternativa de divisão de queda na qual ele se integra, o seu dimensionamento poderá variar de alternativa para alternativa, devendo-se adotar o dimensionamento que não limita o aproveitamento do potencial em qualquer das alternativas. O sistema SINV, além das funções para dimensionamento em separado de potências instaladas, Energia Firme (item 3.2), e de depleções máximas, Otimização Volume Útil (item 3.3), dos aproveitamentos de uma alternativa, disponibiliza a função Dimensionamento energético que, considerando um conjunto de alternativas, dimensiona concomitantemente os três parâmetros de dimensionamento de todos os aproveitamentos estudados.

A função Dimensionamento Energético utiliza um algoritmo de dimensionamento com 4 fases:

FASE 1 – Inicialização

A primeira fase é caracterizada pelo uso dos procedimentos aproximados para avaliação energética descritos no item 3.2.1. Aplica-se o algoritmo da função Otimização Volume Útil (opção Cálculo Simplificado) a todas as alternativas analisadas, dimensionando-se as quedas de referência, potências instaladas e as depleções máximas de cada aproveitamento. Escolhe-se para cada aproveitamento o menor dos valores de queda de referência e os maiores valores de potências instaladas e de depleções máximas.

Relatório Técnico – 29435 / 2016

FASE 2 – Dimensionamento da queda de referência.

Nesta fase dimensiona-se as quedas de referência através de um esquema iterativo para considerar as influências das depleções máximas e das potências instaladas assim como das próprias quedas de referência.

No primeiro passo considera-se as quedas de referência e potências obtidas na fase 1. Aplica-se o algoritmo da função Otimização Volume Útil a todas as alternativas analisadas, obtendo-se as depleções máximas de cada aproveitamento em cada alternativa, calculando-se também as quedas de referências e potências instaladas de cada aproveitamento. Escolhe-se então a queda de referência, a depleção máxima e a potência instalada de cada aproveitamento, conforme os mesmos critérios da fase 1.

No passo seguinte o processo é refeito considerando-se as quedas de referência e potências instaladas calculadas no passo anterior. O processo é repetido 3 vezes, obtendo-se o dimensionamento final das quedas de referências e dimensionamentos preliminares das depleções máximas e potências instaladas.

FASE 3 – Dimensionamento das depleções máximas

Nesta fase considera-se as quedas de referências obtidas na fase 2, e adota-se um esquema iterativo para considerar a influência da potência instalada.

No primeiro passo considera-se as potências instaladas obtidas na fase 2. Utilizando-se do algoritmo da função Otimização Volume Útil (item 3.3), aplicada a todas as alternativas analisadas, obtem-se as depleções máximas de cada aproveitamento em cada alternativa, calculando-se também a potência instalada de cada aproveitamento. Escolhe-se então a depleção máxima e a potência instalada de cada aproveitamento pelo maior valor, conforme sugerido no item 2.6.4.

No passo seguinte o processo é refeito, considerando-se as potências instaladas calculadas no passo anterior. O processo é repetido quatro vezes, obtendo-se o dimensionamento final da depleção máxima e um dimensionamento preliminar de potência instalada em cada aproveitamento.

FASE 4 – Dimensionamento das potências instaladas

Nesta fase considera-se as quedas de referências obtidas na fase 2 e as depleções máximas obtidas na fase 3, e adota-se um esquema iterativo para considerar a influência das próprias potências instaladas em seu dimensionamento.

No primeiro passo considera-se as potências instaladas obtidas na fase 3. Simulando-se as alternativas analisadas, obtem-se as potências instaladas de cada aproveitamento em cada alternativa. Escolhe-se então a potência instalada de cada aproveitamento pelo maior valor.

No passo seguinte o processo é refeito, considerando-se as potências instaladas calculadas no passo anterior. O processo é repetido três vezes, obtendo-se o dimensionamento final da potência instalada em cada aproveitamento.

3.5 VERIFICAÇÃO REENCHIMENTO VOLUME ÚTIL

Esta função tem como objetivo verificar se os reservatórios da alternativa serão capazes de reencher em um período de até 36 meses, contados a partir do fim do período crítico. Se os volumes úteis destes aproveitamentos não atenderem a esse critério, esta função proporá novo volume útil.

A metodologia de verificação considera como a vazão defluente de um aproveitamento na fase de reenchimento, a vazão média dos m meses ($m = 1, \dots, 36$ meses) subseqüentes ao fim do período crítico, debitada das vazões evaporadas, das vazões médias líquidas retiradas para outros usos e das vazões retidas para reenchimento dos reservatórios a montante do aproveitamento em investigação, inclusive a própria, de acordo com a fórmula abaixo:

$$Q_{defli} = Q_{med_m_i} - \sum_{k \in M_i} \left[\left(\frac{Evap_{kx} \times A_{medk}}{2628} \right) + \left(\frac{V_{uk}}{N_{seg}} \right) + Q_{retk} \right]$$

Onde:

M_i - conjunto de aproveitamentos a montante de i , inclusive;

Q_{defli} - vazão média defluente do aproveitamento i no período de reenchimento, em m^3/s ;

$Q_{med_m_i}$ - vazão média dos " m " meses subseqüentes ao período crítico no local do aproveitamento i , em m^3/s ;

$Evap_{mltk}$ - evaporação líquida média no reservatório k , em mm ;

A_{medk} - área do reservatório do aproveitamento k correspondente ao nível do reservatório k , deplecionado de metade do seu volume útil, em km^2 ;

V_{uk} - volume útil do aproveitamento k , em m^3 ;

Q_{retk} - vazão média retirada do reservatório do aproveitamento k , para outros usos, em m^3/s ; e

N_{seg} - número de segundos nos " m " meses.

A vazão mínima defluente na fase de operação é definida como o maior valor entre a vazão mínima para atendimento das restrições socioambientais, informada na tela de local barrável, e a vazão para operação de apenas uma unidade geradora, que pode ser calculada automaticamente pelo Sistema através de uma fórmula apresentada abaixo ou pode ser informada pelo usuário na tela de projeto no campo vazão mínima turbinável.

$$Q_{\min_opi} = \text{máximo} \left(Q_{\min_ambi}; \frac{P_i \cdot F_i}{n_i \cdot H_{lmi} \cdot 0,0088} \right)$$

Onde:

Q_{\min_opi} - vazão mínima defluente no período de operação do aproveitamento i , em m^3/s ;

Q_{\min_ambi} - vazão mínima defluente do aproveitamento i por restrições sócio-ambientais, em m^3/s ;

P_i - potência instalada do aproveitamento i , em MW;

F_i - fator que representa o nível mínimo de operação do conjunto turbina-gerador do aproveitamento i (turbina Francis: $F = 0,60$ e turbina Kaplan ou Bulbo: $F = 0,35$);

n_i - número de unidades do aproveitamento i ; e

H_{lmi} - queda líquida média do aproveitamento i , em metros.

Se a vazão defluente de todos os aproveitamentos for maior ou igual à vazão mínima defluente (para qualquer hipótese de m variando de 1 a 36 meses), os reservatórios serão capazes de reencher no período considerado. Logo, não necessitará de redução de volume útil.

Caso contrário, num processo iterativo, do conjunto de aproveitamentos que estão sendo inventariados, será reduzido o volume útil do reservatório localizado mais a montante na cascata e que tenha apresentado uma vazão defluente inferior à vazão mínima. Esta redução será suficiente para que a vazão defluente do aproveitamento que está tendo o seu volume útil reduzido seja igual à vazão mínima defluente no período de operação.

Em seguida, serão redimensionadas as potências instaladas dos aproveitamentos, e refeita a verificação de reenchimento. Este processo segue até que as vazões defluentes de todos os aproveitamentos sejam maiores que as suas respectivas vazões mínimas, inclusive as vazões mínimas dos aproveitamentos existentes. Observa-se que no caso dos aproveitamentos existentes a garantia de suas vazões mínimas é feita reduzindo-se os volumes úteis dos aproveitamentos ainda não existentes.

3.6 ELIMINA

Este módulo tem como objetivo a eliminação de aproveitamentos ou grupos de aproveitamentos não-competitivos de uma Alternativa de Divisão de Queda, ou seja, aproveitamentos ou grupos de aproveitamento cujos índices custo/benefício energético sejam superiores ao custo unitário de referência CUR.

Como a eliminação de um aproveitamento ou de um grupo de aproveitamentos de uma alternativa provoca alterações nos índices custo/benefício energético dos outros aproveitamentos, o processo de eliminação deve ser iterativo, procurando-se garantir que ao seu final somente aproveitamentos economicamente competitivos em última adição façam parte da alternativa.

A função ELIMINA adota um método simplificado onde a eliminação de aproveitamentos ou de grupo de aproveitamentos é feita tendo como critério o custo incremental, ou seja, um aproveitamento ou grupo de aproveitamentos é eliminado sempre que o seu custo incremental seja maior que o custo unitário de referência. Neste sentido a função ELIMINA utiliza o processo básico do algoritmo de ordenação econômica da construção dos aproveitamentos da alternativa descrito no item 3.7.

3.7 AVALIAÇÃO ECONÔMICA ENERGÉTICA

A avaliação econômico-energética das Alternativas de Divisão de Queda é feita através do índice custo/benefício energético cujo cálculo é explicado no item 2.6.6 Deve-se ressaltar que os benefícios energéticos das alternativas podem ser obtidos pelo Cálculo Simplificado (item 3.2.1) ou por Simulação (item 3.2.2).

3.8 ORDENA

A função ORDENA coloca os aproveitamentos de uma Alternativa de Divisão de Queda em ordem crescente de custo incremental. Esta ordenação é feita através de um processo iterativo básico formado pelos seguintes passos.

- 1- Calcula-se para cada aproveitamento e para cada grupo com até n aproveitamentos não existentes da alternativa, índices custo/benefício energético de primeira adição supondo como já construídos apenas os aproveitamentos existentes incluídos na alternativa analisada.
- 2- Escolhe-se o aproveitamento ou grupo de aproveitamentos de menor índice custo/benefício energético de primeira adição para ser o primeiro aproveitamento ou grupo de aproveitamentos na Ordem Econômica de Construção da alternativa em análise.

3- Recalcula-se os índices custo/benefício energético de cada aproveitamento e de cada grupo com até n aproveitamentos ainda não incluídos na Ordem Econômica de Construção supondo como construídos além dos existentes somente os que já foram incluídos na Ordem Econômica de Construção.

4- Escolhe-se o aproveitamento de menor índice calculado no passo 3 para ser adicionado à Ordem Econômica de Construção.

5- Repete-se os passos 3 e 4 até que todos os aproveitamentos da alternativa sejam incluídos na Ordem Econômica de Construção.

Nota: Os ganhos de energia firme calculados nos passos 1 e 3 podem ser obtidos pelo Cálculo Simplificado ou por Simulação.

Tendo em vista as interdependências entre aproveitamentos, não se pode restringir cada iteração à verificação da competitividade econômico-energético isolada dos aproveitamentos, devendo-se também verificar a existência de grupos de aproveitamentos competitivos. A adoção de verificação apenas de aproveitamento isolado pode resultar numa ordenação de construção com custos incrementais não crescentes.

Por outro lado, a tentativa de se verificar a cada iteração todos os possíveis grupos de aproveitamentos possíveis de serem formados com os aproveitamentos ainda não incluídos na Ordenação Econômica de Construção torna o algoritmo computacionalmente lento. As seguintes propriedades podem ser usadas para reduzir o tempo de processamento do algoritmo:

a) Se a lista de custos incrementais resultante de uma ordenação completa com adições simultâneas de até n projetos não for monótona-crescente e a lista com adições de até $n+1$ projetos for monótona-crescente então esta última lista é a ordenação correta. Em outras palavras, esta propriedade garante que se a ordenação correta contém agrupamentos de no máximo 2 a 2 projetos, por exemplo, não é necessário pesquisar os agrupamentos 3 e 3, 4 a 4, etc. Assim, podemos concluir que apenas quando a lista de custos incrementais resultante de uma ordenação com adições até n a n não for monótona-crescente é necessário proceder a uma ordenação com adições até $n+1$ a $n+1$.

b) Se um trecho da lista resultante de uma ordenação com adições de até n projetos já for monótono-crescente então este trecho não mais se altera a medida em que se refaz a ordenação com adições de até $n+1$, até $n+2$, ... projetos. Em outras palavras, esta propriedade garante que se pode refazer a ordenação apenas para o intervalo de custos em que a função não é monótona-crescente, excluindo do algoritmo os projetos já ordenados.

A função ORDENA aplica o processo iterativo básico inicialmente verificando aproveitamentos isolados ($n=1$). Se a lista de custos incrementais resultante já for monótona-crescente então a ordenação está terminada. Caso contrário, aumenta-se n de uma unidade e refaz-se a ordenação dos trechos não monótonos-crescentes.

Adicionalmente à ordenação por custo incremental, a função ORDENA fornece ainda as ordenações por índice custo-benefício em primeira e última adição.

3.9 CÁLCULO PERÍODO CRÍTICO

A função Cálculo Período Crítico obtém o período crítico da bacia estudada tendo como base uma Alternativa de Divisão de Queda selecionada pelo usuário. A obtenção do período crítico pode ser feita por um método expedito ou através do uso da simulação.

No método expedito todo o sistema de reservatórios correspondente à Alternativa de Divisão de Queda selecionada pelo usuário é representado por um único reservatório localizado no local barrável mais a jusante do estudo e com volume útil dado pela soma de todos os volumes úteis no sistema. Este reservatório é considerado como cheio no início do histórico de vazões e uma simulação da evolução do seu armazenamento ao longo do período histórico é feita operando-se o reservatório de modo a tentar atender mês a mês um valor meta pré-estabelecido de defluência.

Na primeira iteração, considera-se como meta de defluência a menor afluência mensal do período histórico analisado. Caso não tenha sido necessário o esvaziamento total do reservatório em nenhum dos meses simulados, e portando a meta de defluência tenha sido sempre atendida, incrementa-se a meta e reinicia-se outra simulação. Através de um algoritmo de procura, o programa identifica a menor meta de defluência para a qual o reservatório chega a esvaziar durante a simulação. O período crítico da bacia é então definido pelo último mês antes do esvaziamento no qual o reservatório inicia cheio e pelo mês em que o reservatório termina vazio.

No caso do usuário solicitar o cálculo por simulação um algoritmo similar ao método simplificado é utilizado: Todos os reservatórios são considerados como cheios ao início do histórico de vazões. Supõe-se um mercado objetivo, inicialmente igual à 1/4 da energia firme da Alternativa de Divisão de Queda selecionada, obtida pelo Cálculo Simplificado (item 3.2.1) e considerando-se o período crítico obtido pelo método expedito descrito acima.

O sistema é então simulado conforme descrito no item 3.2.2 por todo o período histórico. Durante a simulação a cada início de mês verifica-se se trata-se de um mês de início de período de esvaziamento do sistema, identificados como os meses nos quais no início todos os reservatórios do

sistema estão cheios e/ou no mês anterior foi atendido o mercado objetivo. A cada final de mês atualiza-se a média da energia gerada durante o período de esvaziamento em curso e calcula-se a energia armazenada no sistema. Caso em nenhum mês da simulação a energia armazenada no sistema tenha caído abaixo de 2% da geração média do período de esvaziamento em curso, incrementa-se o mercado objetivo e reinicia-se outra simulação. Através de um algoritmo de procura identifica-se o menor valor de mercado objetivo para o qual a energia armazenada atinge o critério de esgotamento. O período crítico é então definido pelo mês de início do período de esvaziamento que levou à energia armazenada ao seu esgotamento e o mês em cujo final a energia armazenada do sistema se esgotou.

3.10 CÁLCULO IMPACTO SOCIOAMBIENTAL NEGATIVO

O índice socioambiental negativo de uma alternativa de divisão de queda deve expressar o grau de impacto sobre a área de estudo do conjunto dos aproveitamentos que a compõem. A obtenção deste índice visa a hierarquização das alternativas em função do atendimento ao objetivo de **minimização dos impactos socioambientais negativos**. Nos Estudos Preliminares, este índice em conjunto com o índice custo/benefício energético permite a seleção daquelas alternativas que irão ser objeto de análise nos Estudos Finais.

Nos Estudos Finais, este índice subsidia a comparação e a seleção da melhor alternativa de divisão de queda.

Os procedimentos para o cálculo deste índice estão apresentados no item 2.7.

3.11 CÁLCULO IMPACTO SOCIOAMBIENTAL POSITIVO

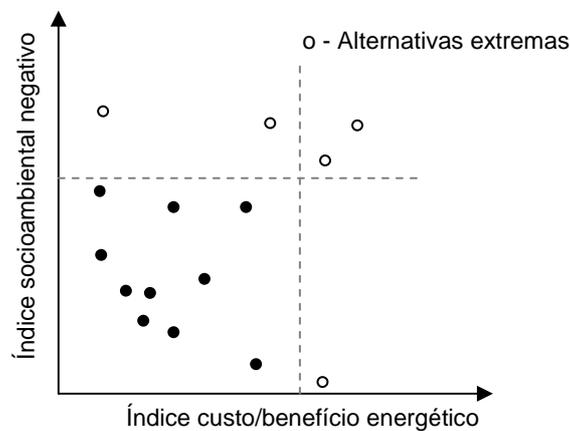
O índice ambiental de uma alternativa de divisão de queda deve expressar o grau de alterações favoráveis sobre a área de estudo do conjunto dos aproveitamentos que a compõem. A obtenção deste índice visa a seleção de Alternativas, que é feita tendo como critério básico a maximização da eficiência econômico-energética, em conjunto com a minimização dos impactos socioambientais negativos, **considerando-se adicionalmente os impactos socioambientais positivos**. Este índice é considerado apenas nos Estudos Finais.

Os procedimentos para o cálculo deste índice estão apresentados no item 2.7.

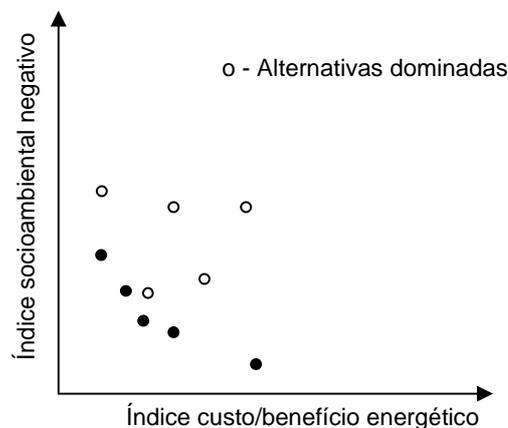
3.12 ANÁLISE MULTIOBJETIVO PRELIMINAR

Para efeito da seleção das Alternativas no conjunto Otimizadas Preliminares que passarão para os Estudos Finais utiliza-se a representação cartesiana, onde em um dos eixos estará representado o índice custo/benefício energético e no outro o índice ambiental, e os seguintes conceitos:

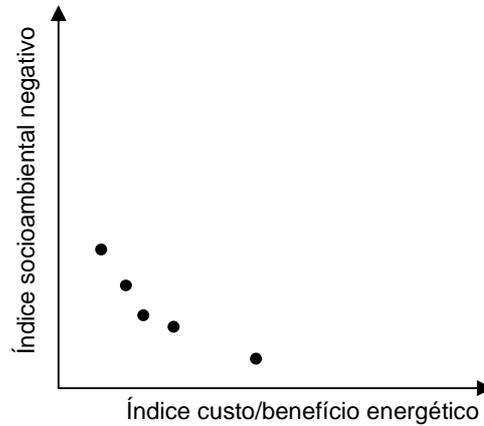
Regiões Extremas: As alternativas que se situarem nas regiões extremas da representação cartesiana, correspondentes a altos índices custo/benefício energético e/ou ambiental, devem ser descartadas. O programa solicita ao usuário que forneça o percentual de alternativas em cada eixo que serão consideradas como extremas.



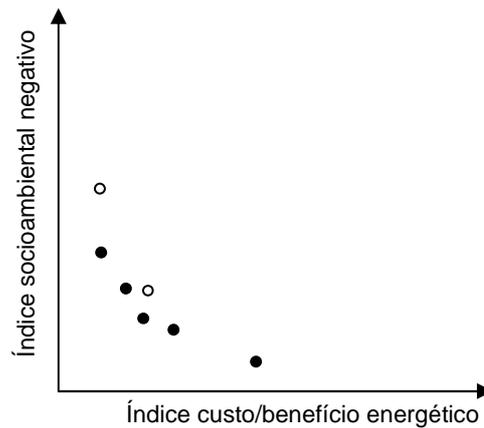
Alternativas Dominadas: Uma alternativa é dominada se existe alguma outra alternativa com índices custo/benefício energético e ambiental inferiores. Toda Alternativa Dominada é descartada.



Alternativas Não-dominadas: Após o descarte das regiões extremas e das Alternativas Dominadas, deverá restar ainda um certo número de Alternativas Não-Dominadas que em princípio deverão passar para os Estudos Finais.



Caso este conjunto seja pouco numeroso o usuário poderá aumentá-lo, selecionando diretamente do gráfico ou automaticamente, buscando entre as alternativas dominadas um novo conjunto de alternativas não-dominadas.



3.13 ANÁLISE MULTI OBJETIVO FINAL

Para a hierarquização das Alternativas no conjunto Otimizadas Finais utiliza-se os pesos relativos fornecidos pelo usuário. O sistema oferece uma representação cartesiana dividida duas partes. A primeira, para cálculo do índice de preferência (I), através da composição dos eixos do índice custo/benefício energético e do índice socioambiental negativo. A segunda parte da função, calcula o índice de preferência modificado (I'), através da composição dos eixos índice de preferência e impacto socioambiental positivo.

Esta função também hierarquiza as alternativas pelos dois índices de preferência, permitindo a seleção da melhor alternativa e a realização de análises de sensibilidade para os valores dos pesos ρ_{cb} , ρ_{an} , ρ_{ap} , de forma a identificar alternativas robustas.

4. BIBLIOGRAFIA

CEPEL (2012), *Proposta Metodológica para a consideração do Impacto Socioambiental Negativo do Não-Aproveitamento de Potenciais Hidrelétricos Economicamente Atrativos em Estudos de Inventário de Bacias Hidrográficas – Detalhamento*. Relatório Técnico DP/DEA 39654/2012.

MME (2007), *Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas*.