UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA REDUÇÃO DA CAPACIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA EM PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

Alessandra Aparecida de Lima

Belo Horizonte

Fevereiro, 2018

Alessandra Aparecida de Lima

METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA REDUÇÃO DA CAPACIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA EM PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

Tese apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Energia e Sustentabilidade

Orientador: Prof. Dr. Carlos Barreira Martinez

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2018

Lima, Alessandra Aparecida de.
L732m Metodologia para análise da redução da capacidade de geração de energia em pequenas centrais hidrelétricas [manuscrito] / Alessandra Aparecida de Lima. – 2018.
120 f., enc.: il.

Orientador: Carlos Barreira Martinez.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 114-120.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Metodologia - Teses. 3. Energia elétrica - Teses. 4. Energia elétrica - Produção - Teses. I. Martinez, Carlos Barreira. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário
31270-901 – Belo Horizonte – MG
Tel.:+55 31 3409.5145
E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

"METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA REDUÇÃO DA CAPACIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA EM PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS"

ALESSANDRA APARECIDA DE LIMA

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de **"Doutora em Engenharia Mecânica"**, na área de concentração de **"Calor e Fluídos".**

Tese aprovada no dia 27 de fevereiro de 2018.

Por:

Prof. Carlos Barreira Martinez
Orientador - Depto. de Eng. Hidráulica e Recursos Hídricos/UFMG

Prof. Aloysio Portugal Maia Saliba
Coorientador-Depto. de Eng. Hidráulica e Recursos Hídricos/UFMG

Profa. Edna Maria de Faria Viana
Depto. de Eng. Hidráulica e Recursos Hídricos/UFMG

Prof. Paulo Henrique Vieira Magalhães
Universidade Federal de Ouro Preto/UFOP

Prof. Rafael Emilio Lopes
Universidade Federal de Itajubá

Prof. Jorge Luis Zegarra Tarqui
Depto. de Eng. Hidráulica e Recursos Hídricos/UFMG

AGRADECIMENTOS

Ao professor, amigo e orientador Carlos Barreira Martinez, pela oportunidade, compromisso, seriedade, dedicação, paciência e companheirismo.

Ao Professor Aloysio Saliba e ao colega Márcio Resende, pelo fundamental incentivo na reta final do trabalho.

Aos meus pais, Antônio e Nilza, pelo empenho em minha educação.

A DEUS, pelo dom da vida e por tudo que ela tem me proporcionado.

RESUMO

A energia firme produzida por empreendimentos hidrelétricos é diretamente dependente da vazão afluente aos dispositivos de geração, do desnível topográfico existente no local de implantação da usina, bem como do rendimento do circuito de adução e do grupo gerador. Essas variáveis e/ou parâmetros básicos, que podem ser determinados metodologicamente de diferentes formas, a depender da disponibilidade de dados e das características do local de implantação das usinas, podem sofrer influência de diferentes fatores. A disponibilidade hídrica superficial de uma determinada região pode ser influenciada pela variação do regime hidrometeorológico, como também pela variação das diferentes formas de uso e ocupação do solo. Em usinas que dependem da regularização de vazões, o desnível topográfico pode variar em função do deplecionamento do nível do reservatório e da época do ano. Os rendimentos do circuito de adução e do grupo gerador são dependentes da dimensão e rugosidade das paredes dos sistemas de condução de água, bem como da geometria dos equipamentos hidromecânicos, os quais podem sofrer variações ao longo da vida útil da instalação, sendo, portanto, de difícil determinação. Na grande maioria dos casos os impactos na produção e/ou geração de uma determinada usina hidrelétrica são atribuídos apenas à variação da disponibilidade hídrica superficial. No entanto, os três fatores citados podem produzir tais impactos, de forma independente ou agrupada. Diante do exposto, esse trabalho propõe uma metodologia baseada na **análise sistêmica** para se avaliar e identificar fatores responsáveis por suposto decaimento na energia firme de usinas hidrelétricas inseridas em bacias hidrográficas de pequeno porte, incluindo desde a análise de intervenções relacionadas à dinâmica das águas subterrâneas e superficiais até a evolução temporal da perda de carga nas tubulações de baixa e alta pressão que compõem o sistema de geração das usinas. Como resultado dessa avaliação, aplicada a uma bacia hidrográfica dotada de um conjunto de Pequenas Centrais Hidrelétricas, foi possível constatar que, de fato, diversos fatores podem intervir na capacidade de geração e que nem sempre a alteração na disponibilidade hídrica local é a única e maior responsável por esses impactos. Os resultados do estudo de caso indicaram o envelhecimento dos componentes do sistema de adução e geração como o maior responsável pela queda na capacidade de geração das usinas. Dessa forma e com base em dados de rugosidade interna das tubulações do circuito de adução das usinas foi possível propor e avaliar, ainda, uma equação para permitir a estimativa do fator de envelhecimento e associar aos impactos na geração.

ABSTRACT

The energy produced by hydroelectric projects is directly dependent on the flow, the topographic at the site of the plant, as well as the efficiency of the adduction circuit and generator set. These variables and / or basic parameters, which can be determined methodologically in different ways, depending on the availability of data and the characteristics of the plant implantation site, may be influenced by different factors. The surface water availability of a given region can be influenced by the variation of the hydrometeorological regime, as well as by the variation of the different forms of land use and occupation. In plants that depend on the regularization of flows, the topographic difference may vary due to the depletion of the reservoir level and the time of year. The yields of the adduction circuit and generator set are dependent on the size and roughness of the walls of the water conduction systems as well as the geometry of the hydromechanical equipments, which can vary during the life of the installation, difficult to determine. In the vast majority of cases, impacts on the production and / or generation of a given hydroelectric plant are attributed only to the variation in surface water availability. However, the three factors cited can produce such impacts, independently or in groups. In view of the above, this work proposes a methodology based on the systemic analysis to evaluate and identify factors responsible for the supposed decay in the energy of hydroelectric power plants inserted in small hydrographic basins, including from the analysis of interventions related to the dynamics of groundwater and to the time evolution of the pressure loss in the low and high pressure pipes that make up the power generation system. As a result of this evaluation, applied to a hydrographic basin equipped with a set of Small Hydropower Plants, it was possible to verify that, in fact, several factors can intervene in generation capacity and that the change in local water availability is not always the only one responsible for these impacts. The results of the case study indicated the aging of the components of the adduction and generation system as the main responsible for the decrease in the generation capacity of the plants. Thus, based on internal roughness data from the pipelines of the mills' adduction circuit, it was possible to propose and evaluate an equation to allow the estimation of the aging factor and to associate the impacts on the generation.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS ..... **IX**

LISTA DE TABELAS ..... **XI**

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS ..... **XIII**

1 INTRODUÇÃO **1**

2 OBJETIVOS **3**

2.1 OBJETIVO GERAL 3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 3

3 REVISÃO DA LITERATURA **4**

3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO GERAL 4
3.2 ABORDAGEM SISTÊMICA 7
3.2.1 Conceitos Gerais *7*
3.2.2 Abordagem Sistêmica aplicada à Engenharia de Recursos Hídricos *12*
3.3 AVALIAÇÃO DAS DISPONIBILIDADES HÍDRICAS SUPERFICIAIS 15
3.4 AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS 18
3.5 AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE EROSÃO E DO ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIOS 21
3.6 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO HIDROENERGÉTICA 24
3.7 AVALIAÇÃO DA PERDA DE CARGA EM TUBULAÇÕES 27

4 METODOLOGIA **34**

4.1 ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS 39
4.2 ESTUDOS HIDROLÓGICOS 40
4.3 ESTUDOS SEDIMENTOLÓGICOS 42
4.4 ESTUDOS ENERGÉTICOS 44

5 CONCLUSÕES **48**

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **49**

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Diagrama de enlance casual (Fonte: ANDRADE, 1997).....9

Figura 3.2 – Sistema de aquecimento controlado por termostato (Fonte: ANDRADE, 1997). .9

Figura 3.3 – Diagrama de fluxo de um sistema de aquecimento controlado por tesmostado (Fonte: ANDRADE, 1997).....10

Figura 3.4 – Os níveis do pensamento sistêmico ilustrados pela teoria do *iceberg* (ANDRADE, 1997). 10

Figura 3.5 – Etapas para o desenvolvimento do método e aplicação do pensamento ou abordagem sistêmica (Fonte: BORGES, 2000). 11

Figura 3.6 – Roteiro para realização de um estudo de simulação dentro da abordagem sistêmica (Fonte: LAW e KELTON, 1991 *apud* BORGES, 2000).....14

Figura 3.7 – Curva de evolução do coeficiente de perda de carga de Hazen-Williams em uma tubulação forçada (USDA, 1950 *apud* AZEVEDO NETO, 1961).....30

Figura 3.8 – Variação do Coeficiente de Hazen-Williams (C) em tubulações de ferro fundido para 30 anos de uso em função do PH da água (AZEVEDO NETO, 1961). 30

Figura 3.9 – Ábaco de Moody (MOODY, 1944). 31

Figura 4.1 – Diagrama de enlace casual simplificado aplicado ao estudo de avaliação de impactos na capacidade de geração de energia em usinas hidrelétricas. 35

Figura 4.2 – Proposição das etapas para desenvolvimento e aplicação da abordagem sistêmica na avaliação de impactos na capacidade de geração de energia de usinas hidrelétricas. 36

Figura 4.3 – Agrupamento de áreas e estudos que devem ser realizados visando a identificação de fatores que podem impactar a geração de energia de usinas hidrelétricas. 38

Figura 4.4 – Representação esquemática simplificada de um modelo para simulação e avaliação de impactos na capacidade de geração de usinas hidrelétricas.....39

Figura 5.1 – Croqui do complexo de usinas hidrelétricas, utilizado como base do modelo de simulação para avaliação de impactos na capacidade de geração.**Erro! Indicador não definido.**

Figura 5.2 – Diversidade de usos do solo e dos recursos hídricos identificados nos limites da bacia hidrográfica selecionada..... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 5.3 – Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica selecionada como estudo de caso, referente aos anos de 1950, 2002 e 2012. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 5.4 – Trechos de sub-bacias considerados como domínios para análise dos aspectos hidrogeológicos. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 5.5 – Caracterização conceitual dos vetores direcionais de fluxo da água subterrânea no interior e nas vizinhanças da bacia em estudo, em função de seus elementos intervenientes naturais e antrópicos (Adaptado de CODEMIG, 2005). ..... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 5.6 – Variação temporal dos dados de monitoramento de precipitação, vazão de bombeamento de poços, cotas piezométricas e descarga líquida de nascentes no entorno das áreas de cava de algumas das minas existentes na bacia. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 5.7 – Hietograma de precipitação total diária na bacia hidrográfica em estudo. .... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 5.8 – Hietograma de precipitação total média anual na bacia hidrográfica em estudo. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 5.9 – Mapeamento dos usos e resultados das simulações chuva-vazão de avaliação do efeito de impermeabilização e alteração do uso do solo na sub-bacia 04.**Erro! Indicador não definido.**

Figura 5.10 – Subdivisão da bacia hidrográfica selecionada em micro-bacias para análise das taxas de produção de sedimentos. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 5.11 – Produção específica total de sedimentos das sub-bacias analisadas em comparação com a curva envoltória de Khosla. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 5.12 – Linha do tempo de implantação de benfeitorias na bacia hidrográfica em estudo e sua relação temporal com o assoreamento dos reservatórios das Barragens A, B e C. ... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 5.13 – Histórico de geração das usinas do complexo hidrelétrico da bacia em estudo. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 5.14 – Restituição da série de vazões médias mensais turbinadas pela Usina A na condição atual de operação e na hipótese de repotenciação do sistema.**Erro! Indicador não definido.**

Figura 5.15 – Síntese dos resultados de calibração do modelo de simulação hidroenergética aos dados da bacia em estudo. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 5.16 – Síntese evolução da rugosidade em tubulações de aço com diferentes tempos de uso e Re variando de 3,3x106 à 5,7x106. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 5.17 – Evolução do coeficiente de perda de carga f em tubulações de aço para diferentes tempos de uso..... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 5.18 – Valores de rugosidade superficial em tubos de ferro fundido com velocidades de 2,5 m/s em função do tempo de uso (Re variando de $2{,}5x10^5$ a $2{,}2x10^6$).**Erro! Indicador não definido.**

Figura 5.19 – Valores de rugosidade superficial em tubos de ferro fundido com velocidades de 2,5 m/s em função do tempo de uso, para diâmetros entre 100 mm e 350 mm.**Erro! Indicador não definido.**

Figura 5.20 – Valores de rugosidade superficial em tubos de ferro fundido com velocidades de 2,5 m/s em função do tempo de uso, para diâmetros entre 400 mm e 750 mm.**Erro! Indicador não definido.**

Figura 5.21 – Valores de rugosidade superficial em tubos de ferro fundido com velocidades de 2,5 m/s em função do tempo de uso, para diâmetros entre 900 mm e 1500 mm. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 5.22 – Ajuste matemático aos primeiros, segundos e terceiros termos das equações indicadas nas Figuras 5.19 a 5.21. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 5.23 – Ajuste matemático aos dados de rugosidade da tubulação calculados em função do pH da água para tubos com 30 anos de utilização. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 5.24 – Ajuste matemático aos termos da primeira e segunda parcelas das equações de ajuste da variação da rugosidade em função do pH da água para tubos com 30 anos de utilização..... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 5.25 – Rugosidade superficial pra tubulações de Pequenas Centrais Hidrelétricas em função do tempo de operação. ..... **Erro! Indicador não definido.**

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Termos da equação de perda de solo: RUSLE (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1985). 24

Tabela 3.2 – Erros percentuais máximos obtidos por diversas equações empíricas utilizadas na determinação do coeficiente de perda de carga f (BRKIĆ, 2011). 33

Tabela 5.1 – Características das usinas componentes do complexo de usinas da bacia em estudo. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.2 – Sistemas e unidades hidrogeológicas reconhecidas na área de interesse (CODEMIG, 2005). ..... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.3 – Sistemas Distribuição populacional, áreas das superfícies territoriais e densidade demográfica dos municípios da bacia em estudo (IBGE, 2017).**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.4 – Representação temporal das parcelas correspondentes às tipologias de uso e ocupação do solo identificadas na bacia hidrográfica em estudo.**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.5 - Percentuais de água superficial e subterrânea outorgados na bacia hidrográfica em estudo (IGAM, 2017). ..... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.6 - Distribuição percentual das unidades hidrogeológicas aflorantes nos domínios de estudo na bacia hidrográfica em estudo. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.7 – Cômputo da reserva renovável (fluxo de base) nos domínios de interesse e para toda a bacia hidrográfica em estudo. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.8 – Estações fluviométricas pertencentes à rede de monitoramento da ANA selecionadas para o estudo de caracterização hidrológica. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.9 – Indicadores de oferta hídrica nas seções fluviais de interesse hidrológico. .. **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.10 – Avaliação das disponibilidades hídricas superficiais nas seções fluviais de referência. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.11 – Síntese da avaliação da capacidade de regularização dos reservatórios do complexo de usinas da bacia em estudo. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.12 – Síntese dos resultados das simulações chuva-vazão para o período de retorno de 2 anos nas sub-bacias analisadas. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.13 – Quantificação dos processos de erosão na bacia hidrográfica em estudo pela RUSLE. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.14 – Estimativa das taxas de assoreamento nos reservatórios das Barragens A, B e C. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.15 – Fator de utilização e percentual de participação das usinas na geração de energia do período de 1964 a 2012. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.16 – Síntese individualizada dos potencias impactos na redução da capacidade de geração das usinas instaladas na bacia em estudo. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.17 – Ações tomadas na simulações hidroenergéticas diante dos usos da água identificados na bacia em estudo. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.18 – Síntese dos resultados das simulações hidroenergéticas para os cenários de disponibilidade considerados na análise de geração do complexo de usinas da bacia em estudo. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.19 – Potência e Energia Firme resultante das simulações hidroenergéticas para os cenários de disponibilidade considerados na análise de geração do complexo de usinas da bacia em estudo. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.20 – Valor econômico atribuído ao montante de energia gerada pelo complexo de usinas da bacia em estudo..... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.21 – Valor econômico atribuído ao montante de energia gerada pelo complexo de usinas da bacia em estudo..... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.22 – Dados de rugosidade superficial estimado para as tubulações das usinas hidrelétricas da bacia em estudo em função do tempo de operação.**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.23 – Valores do coeficiente C (AZEVEDO NETO, 1961).**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.24 – Valores do fator de perda de carga (*f*) obtidos a partir dos valores do coeficiente *C*. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.25 – Valores de rugosidade superficial das tubulações (em mm) obtidos a partir dos valores do coeficiente *f* e da aplicação da Equação de Nikuradse.**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.26 – Erros relativos resultantes da comparação entre os valores de rugosidade "medidos" e calculados pela Equação 5.7. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.27 – Comparação entre os valores de rugosidade superficial (e) "medidos" e aqueles calculados pela Equação 5.7. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.28 – Fatores de perda de carga *f* obtidos a partir do coeficiente *C* em função do pH da água para tubos com 30 anos de utilização. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.29 – Rugosidade da tubulação em função do pH da água para tubos com 30 anos de utilização..... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.30 – Rugosidade da tubulação em função do pH da água para tubos com 30 anos de utilização e calculado pelas equações de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach, Nikuradse e pela equação proposta no presente estudo. ..... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.31 – Dados de rugosidade superficial pra tubulações de Pequenas Centrais Hidrelétricas em função do tempo de operação..... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.32 – Comparação entre os dados de rugosidade superficial para tubulações de usinas com 30 anos de operação: dados medidos e equação proposta. **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.33 – Perda de espessura da tubulação das usinas analisadas em função do tempo de operação, considerando-se a expansão do produto corroído indicada por Cinadevila (2014). ..... **Erro! Indicador não definido.**

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AD	Área de drenagem
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BIG	Banco de Informações de Geração
C	Coeficiente de perda de carga da equação de Hazen-Williams
C	Fator cobertura do solo da RUSLE
NI	Nikuradse
D	Diâmetro
Def	Déficit na geração
Defetivo	Diâmetro efetivo
Di	Diâmetro interno da tubulação
D_{tub}	Diâmetro da tubulação
DW	Darcy-Weisback
E	Perda de solo por unidade de superfície da RUSLE
e	Espessura da rugosidade da tubulação
E_f	Energia firme no período
ETR	Evapotranspiração média anual real
f	Fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach
g	Aceleração da gravidade
H	Altura de queda
HMS	*Hydrologic Modeling System*
HW	Hazen-Williams
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
IUD	Índice de Utilização das Disponibilidades

J	Perda de carga.
K	Fator erodibilidade do solo da RUSLE
K	Condutividade hidráulica
Ka	Coeficiente adimensional variável em função do tipo de tubulação
Ke	Coeficiente de correção de idade
L	Fator comprimento de rampa da RUSLE
$L_{tub.}$	Extensão da tubulação
n	Número de meses
P	Precipitação média anual correspondente
P	Fator prática conservacionista da RUSLE
PCH	Pequenas Centrais Hidreléricas
pH	Potencial hidrogeniônico
P_{max}	Potência máxima instalada no empreendimento
Pot_{b}	Potência bruta
Pot_{med}	Potência medida
Pot	Potência instalada
PPR	Polipropileno Copolímero Random
PVC	Policloreto de Polivinila
Q	Vazão
$Q_{7,10}$	Vazão mínima com 7 dias de duração e 10 anos de período de retorno
$Q_{95\%}$	Vazão média mensal com 95% de permanência no tempo
Qe	Vazão de engolimento
Q_{ESP}	Vazão específica média de longo termo
Qm	Vazão média turbinada
Q_{MLT}	Vazão média de longo termo
R	Fator erosividade da chuva da RUSLE

Re	Número de Reynolds
RUSLE	Equação Universal de Perda de Solo
S	Fator declividade da RUSLE
SIG	Sistema de Informação Geográfica
T	Tempo de operação da tubulação
V	Velocidade do escoamento
VU	Volume útil
α, β e θ	Coeficientes adimensionais
γ	Massa específica da água
η_{mec}	Rendimento mecânico
$\eta_{global-instal}$	Rendimento total da instalação
η	Rendimento dos equipamentos
ν	Viscosidade cinemática da água
Δ_h	Perda de carga
Δt	Intervalo de tempo

1 INTRODUÇÃO

A água em circulação na Terra, caracterizada como recurso natural e renovável pelos processos do ciclo hidrológico, pode ser captada pelo homem e utilizada para diversas finalidades, as quais englobam desde formas primitivas de transporte até atividades econômicas de vulto, como a geração de energia elétrica (NAGHETTINI, 1999).

A matriz energética do Brasil é composta principalmente por fontes hídricas. De acordo com o Banco de Informações de Geração (BIG) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2017), existem 4734 empreendimentos atualmente em operação, totalizando cerca de 154 GW de potência instalada. Essa matriz representa uma capacidade de geração instalada da ordem de 65% em relação às demais fontes de geração de energia elétrica: eólica, fotovoltaica, marítima e termelétrica.

Em virtude da importância que as usinas hidrelétricas possuem no âmbito da matriz de geração de energia elétrica do Brasil, todas as possíveis interferências em sua capacidade de produção devem ser avaliadas e quantificadas, de forma a permitir a continuidade do fornecimento de energia previsto em projeto.

Considerando a diversidade de usos que podem existir nos limites de uma bacia hidrográfica, ligados direta ou indiretamente aos recursos hídricos superficiais ou subterrâneos, cogita-se que estes produzam efeitos entre si, benéficos ou não. Dessa forma, levando-se em conta a carência de referências sobre esse tema, bacias hidrográficas caracterizadas pela diversidade e simultaneidade de formas de uso dos recursos hídricos superficiais devem ser objeto de estudos que visem identificar, analisar e quantificar as possíveis fontes de impacto na geração de energia de empreendimentos hidrelétricos implantados e em operação nos seus limites.

No que tange à operação das usinas hidrelétricas, que dependem da capacidade de regularização de reservatórios ou da vazão advinda das áreas de contribuição incremental aos cursos de água nos quais estão inseridas as estruturas de tomada de água correspondentes, podem ser consideradas como possíveis fontes de impacto: as interferências provocadas por obras de infraestrutura urbana, incluindo principalmente a impermeabilização do solo; a construção de rodovias e estradas de acesso; a evolução geomorfológica natural dos terrenos da bacia, condicionada à geração e transporte de sedimentos (ANEEL, 2001); a supressão de água para consumo humano, industrial ou agrícola e a operação de empreendimentos minerários (FREITAS, 2012), entre outros.

As três primeiras possíveis fontes de impacto podem contribuir para a supressão da vegetação e geração de materiais e sedimentos os quais, segundo CARVALHO (2008), após serem transportados pelos cursos de água se depositam nos reservatórios das usinas, reduzindo sua capacidade de armazenamento e regularização; e/ou são aduzidos pelos condutos forçados das usinas provocando um efeito abrasivo no interior dos sistemas hidráulicos, reduzindo sua eficiência operacional ao longo do tempo. A supressão de água para abastecimento público, agrícola ou industrial também pode ser caracterizada como fonte de possível impacto, pois, caso seja realizada por meio de captação a fio-d'água, reduz as disponibilidades hídricas nos cursos de água que alimentam as usinas, impactando diretamente a produção de energia.

As operações relacionadas à atividade minerária podem ser possível fonte de interferência na geração de usinas pelas mesmas razões apresentadas anteriormente, mas principalmente por serem associadas ao maior consumidor de água (FREITAS, 2012) e por proporcionar, em alguns casos, rebaixamento do lençol freático. Este efeito de rebaixamento pode impactar nascentes e os cursos de água que são alimentados pelos aquíferos correspondentes, os quais abastecem reservatórios de regularização ou os sistemas de adução de usinas.

Diante desse quadro de possíveis diferentes interferências, que se caracteriza como um problema complexo de Engenharia de Recursos Hídricos, foi proposta a aplicação de uma metodologia baseada na análise e simulação de sistemas para nortear a identificação, avaliação e quantificação, de forma integrada, de impactos na capacidade de geração de empreendimentos hidrelétricos inseridos em bacias hidrográficas de pequeno porte.

Para subsidiar essa análise foi selecionado um estudo de caso, no qual os principais componentes e variáveis que poderiam influenciar a capacidade de geração de usinas foram representados na forma de um sistema complexo e analisados sob essa ótica. Dessa forma foram realizados estudos de caracterização ambiental integrados, com objetivo de aprofundar o conhecimento do regime hídrico da região e mapear as possíveis fontes de impacto na geração. Paralelamente foram elaborados estudos e simulações energéticas, envolvendo todos os fatores/variáveis mapeados, visando à estimativa da capacidade de geração potencial e real dos empreendimentos hidroelétricos, considerando cenários anteriores e posteriores à sua implantação. Também foram analisadas mudanças nas regras de operação dos reservatórios, decorrentes do assoreamento e da perda de eficiência dos sistemas hidráulicos, bem como de seus possíveis efeitos e/ou impactos no sistema e na capacidade de geração das usinas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Apresentar uma metodologia, com base na análise sistêmica, para avaliar e identificar os principais fatores que interferem na redução da capacidade de geração de usinas hidrelétricas situadas em pequenas bacias hidrográficas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos dessa pesquisa incluem:

- Construir as bases para aplicação de um modelo sistêmico que permita avaliar a capacidade de geração de usinas hidrelétricas situadas em pequenas bacias hidrográficas;
- Aplicar simulação sistêmica para avaliar as perdas de geração hidroelétrica devido à influência de diferentes fatores e/ou variáveis de entrada, bem como aqueles associados à estrutura interna do sistema;
- Identificar, hierarquizar e analisar diferentes fatores e/ou variáveis externas e internas que afetam a geração hidroelétrica;
- Analisar o impacto dos fatores e/ou variáveis anteriores de forma desagregada, identificando aquele que proporciona efeito negativo no sistema de geração; e,
- Avaliar os impactos dos fatores e/ou variáveis anteriores no sistema de geração das usinas, de forma integrada, valendo-se de um modelo concebido para realizar simulações hidroenergéticas.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO GERAL

De acordo com Porto (2002), a Engenharia de Recursos Hídricos é uma disciplina que envolve decisões relacionadas à infraestrutura hídrica e visa, basicamente, promover a alteração dos padrões qualitativos e quantitativos das disponibilidades de água de forma a adequá-los aos padrões qualitativos e quantitativos das demandas hídricas. A complexidade das decisões que fazem parte dessa disciplina decorre tanto das diferentes possibilidades e formas de suprimento das demandas quanto da variabilidade destas.

As principais categorias de demandas de água podem ser inseridas em três classes principais, quais sejam: (i) infraestrutura social, que incorpora as demandas gerais da sociedade, nas quais a água é um bem de consumo final; (ii) agricultura e aquicultura, que engloba as demandas de água como bem de consumo intermediário, visando a criação de condições ambientais adequadas para o desenvolvimento de espécies animais ou vegetais de interesse para a sociedade; e (iii) industrial, que inclui as demandas para atividades de processamento industrial e energético, nas quais a água também entra como bem de consumo intermediário.

Dentro dessas classes de demandas, os usos da água podem ser caracterizados como **consuntivos**, quando implicam na redução da disponibilidade hídrica de um dado local ou região, e **não consuntivos**, quando não consomem ou não afetam significativamente a quantidade da água ofertada na bacia (NAGHETINI, 1999).

Os usos não consuntivos se referem principalmente às atividades de geração de energia, navegação, turismo e lazer, manutenção de ecossistemas, piscicultura e aquicultura. Porém, ressalta-se que essas atividades podem gerar efeitos sobre a qualidade e/ou sobre o regime de vazões do manancial, apesar de não afetarem a disponibilidade quantitativa da água.

Os usos consuntivos se referem principalmente ao abastecimento público e consumo humano, às atividades relacionadas ao setor agropecuário (irrigação e dessedentação animal) e ao setor industrial, principalmente aqueles ligados às atividades da área de mineração. Estas últimas, porém, podem envolver processos de uso consuntivo (captação e consumo de água) e não consuntivo (recirculação de vazões em barragens de rejeitos).

Rotineiramente e por vício de estruturas institucionais organizadas pelos diferentes setores da economia, as diversas finalidades de uso da água poderão ser contempladas de forma

independente por projetos de recursos hídricos não integrados (PORTO, 2002). A operação desses projetos pode ser desenvolvida sem contratempos até um estágio de utilização intensificada, no qual serão estabelecidos conflitos entre os diversos usos da água, sejam eles de destinação de uso, de disponibilidade qualitativa ou quantitativa. Essa situação reforça a necessidade de harmonizar os diversos usos e projetos, seja por meio de regulamentações legais ou por meio da expansão da oferta hídrica, já em uma base de gerenciamento integrado, de forma a ampliar ou ajustar as disponibilidades hídricas com as diversas demandas.

Ainda segundo Porto (2002), o estágio de apropriação dos recursos hídricos no Brasil atingiu um nível em que conflitos de uso da água são fartamente detectados e suas soluções exigem análises técnicas e institucionais de grande complexidade. O uso múltiplo das águas pode ser uma opção inicial, mas é também uma consequência natural do desenvolvimento econômico.

No entanto e como exemplo, em qualquer bacia hidrográfica em cujos limites for implantado um empreendimento hidrelétrico, haverá conflito com outros usuários que requeiram a utilização ou consumo dos recursos hídricos superficiais e, como consequência, eventuais impactos na capacidade de geração das usinas, conforme abordado por Freitas (2012). Na maioria dos casos, a maior parcela das vazões requeridas para tais usos consuntivos destina-se ao consumo humano e ao abastecimento público. Entretanto, a presença de outros atrativos econômicos pode ocasionar outros conflitos pelo recurso água. Como exemplo, pode-se citar a exploração mineral, atividade com potencial para gerar conflitos com outros usos face às demandas requeridas para sua operação, bem como por usualmente ser implantada nas cabeceiras dos cursos de água, podendo interferir no comportamento das nascentes e/ou alterar a disponibilidade hídrica no trecho de jusante.

Esse cenário demonstra que existe uma grande complexidade relacionada aos problemas de engenharia de recursos hídricos, como aquele associado a alterações na capacidade de geração de usinas hidrelétricas, o que determina a busca de abordagens adequadas para seu tratamento e não a associação pura e simples de um único fator determinante como o responsável pela geração de impactos negativos nesse processo. Atualmente existe uma série de metodologias que foram especificamente desenvolvidas para o tratamento desses tipos de problemas. Uma delas é a análise de sistemas de recursos hídricos, que consiste em uma técnica de solução de problemas complexos de Engenharia de Recursos Hídricos a partir da abordagem sistêmica e do uso de técnicas computacionais agregadas à modelagem matemática de sistemas de recursos hídricos.

Essa forma de abordagem e tratamento foi selecionada, no presente estudo, para tratar do tema de avaliação de possíveis impactos na capacidade de geração de usinas hidrelétricas, que pode ser observado sob a ótica de um sistema complexo de engenharia de recursos hídricos. Nesse sistema, o regime hidrometeorológico, os aspectos geomorfológicos, geológicos e hidrogeológicos, as vazões afluentes, a produção de sedimentos, entre outros, constituem os componentes externos, enquanto as características físicas intrínsecas ao sistema de geração correspondem aos fatores internos.

Nesse sentido, foram pesquisados os princípios que regem a abordagem sistêmica de problemas complexos e de engenharia, bem como os tipos de variáveis envolvidas e as técnicas de análise correspondentes e comumente empregadas.

Tendo em mente o tema do presente estudo, também foram pesquisados os processos ou características que podem interferir direta ou indiretamente na capacidade de geração de usinas hidrelétricas implantadas em bacias hidrográficas de pequeno porte, desprovidas de qualquer tipo monitoramento ou com pouca disponibilidade de dados de toda a natureza (climatológicos, hidrogeológicos, hidrológicos, sedimentológicos, pluviométricos, entre outros), e nas quais fosse detectada a presença de usos múltiplos dos recursos hídricos.

Os itens subsequentes descrevem, de forma sucinta, aspectos relacionados aos métodos convencionalmente empregados no cálculo das disponibilidades hídricas superficiais e aqueles utilizados para mapear e avaliar os aspectos hidrogeológicos de bacias hidrográficas com as características descritas anteriormente. Também foram pesquisados os métodos empregados na avaliação da produção de sedimentos das bacias e da estimativa das taxas de assoreamento de reservatórios, um dos principais processos físicos que podem interferir de forma direta na redução da capacidade de geração de usinas hidrelétricas que dependam da capacidade de armazenamento dessas estruturas.

Além dos temas citados, também são descritos os métodos utilizados para a determinação da perda de carga em tubulações, fator que, embora não esteja associado diretamente com as características físicas das bacias hidrográficas ou se relacione com a disponibilidade quantitativa do recurso água, pode afetar diretamente e, principalmente ao longo do tempo, o circuito de geração dos empreendimentos hidrelétricos.

3.2 ABORDAGEM SISTÊMICA

3.2.1 Conceitos Gerais

A abordagem sistêmica foi introduzida em meados da década de 60, como uma proposta de compreensão da realidade objetiva, que tem por objetivo transcender as fronteiras disciplinares e conceituais da teoria cartesiana e reducionista. De acordo com Freitas e Kaetsu (2015), essa abordagem surgiu, essencialmente, a partir da dificuldade em utilizar a abordagem analítica para explicar fenômenos complexos, que eram influenciados pelo contexto e pelas inter-relações.

Diversos autores como Ludwig Von Bertalanffy, Edgar Morin, Fritjof Capra, Humberto Maturana Romesín, Francisco J. Varela García e Jalcione Almeida estabeleceram conceitos sobre essa forma de abordagem, os quais foram resumidos no trabalho de Vieira *et al.* (2017). Tais teóricos definiram a abordagem sistêmica, de forma abrangente, como um todo organizado e unido, composto por partes interdependentes ou por subsistemas, sendo delimitado por fronteiras identificáveis no âmbito do macro sistema ambiental em que este se insere. Segundo Bertalanffy (1973), o idealizador da Teoria Geral dos Sistemas, a interação dinâmica é o problema básico em todos os campos da ciência moderna, pois o caráter pluridisciplinar indica que o mundo, em verdade, é constituído de sistemas interdependentes.

A Teoria Geral dos Sistemas ou o pensamento sistêmico tem sua base fundamentada na doutrina do expansionismo, que parte do pressuposto de que cada objeto ou fenômeno faz parte de um todo maior. Nesse contexto, os membros devem ser considerados antes de se particularizar um objeto ou fenômeno do estudo e o foco principal está no sistema global composto por todas as partes.

Os sistemas, em si, são normalmente classificados em físicos ou concretos, abstratos ou conceituais, no que tange à sua constituição, e em fechados ou abertos, no que tange à sua natureza (BERTALANFFY, 1973, KASPER, 2000, FREITAS E KAETSU, 2015). Os sistemas físicos ou concretos são aqueles compostos de equipamentos, de maquinaria e de objetos e coisas reais. Os sistemas abstratos ou conceituais são compostos de conceitos, filosofias, planos, hipóteses e ideias. Um sistema fechado é aquele em que não existe nenhum tipo de relacionamento entre ele e o ambiente em que está imerso, enquanto o sistema aberto é aquele onde quase a totalidade dos sistemas se identificam, sendo caracterizado por estabelecer uma inter-relação com todo o ambiente que o rodeia.

Em uma relação dinâmica com o ambiente, os sistemas transformam entradas em saídas. Essa relação, por sua vez, pode ser mais ou menos profunda, dependendo da permeabilidade das fronteiras. A entropia de um sistema pode variar à medida com que a ordenação deste aumenta. Um sistema aberto, por exemplo, pode encontrar seu ponto de equilíbrio com o ambiente ao seu redor, resultando em um valor máximo de entropia, que em linhas gerais significa o desaparecimento do próprio sistema e o início de um equilíbrio dinâmico (PUC, 2017).

Os sistemas apresentam uma característica denominada de *feedback*, a qual está associada à recepção permanente dos resultados de suas próprias ações. Essa característica pode assumir valores positivos, quando o caminho adotado segue o planejado ou desejável, e valores negativos, quando há desvios dos objetivos inicialmente traçados. Conforme citado em PUC (2017), esse conceito indica que: (i) as propriedades ou o comportamento de cada elemento do conjunto têm algum efeito nas propriedades ou no comportamento do conjunto; (ii) nenhuma parte tem um efeito independente sobre o todo e cada parte afeta o funcionamento de pelo menos mais uma parte; e, (iii) qualquer subgrupo de elementos do conjunto satisfaz às propriedades citadas anteriormente, não podendo, portanto, serem organizadas em subgrupos totalmente independentes.

A dinâmica de sistemas foi desenvolvida durante os anos 50, pelo engenheiro Jay W. Forrester, com o objetivo inicial de auxiliar a administração de sistemas industriais complexos (KASPER, 2000). Ainda segundo Kasper (2000), a abordagem da dinâmica de sistemas integra três campos de conhecimentos: (i) engenharia de controle e os conceitos de realimentação e auto-regulação; (ii) a cibernética e o papel da informação em sistemas de controle; e, (iii) a teoria da decisão em organizações humanas. Os avanços da tecnologia de computação digital foram fundamentais para tornar possível a construção de modelos de simulação complexos, aspecto central na elaboração dessa abordagem.

Nesse sentido e de forma geral, pode-se dizer que a dinâmica de sistemas busca o entendimento, a compreensão da estrutura e do comportamento do sistema por meio de enlaces de *feedback* interagentes, que se realizam via fluxos de recursos e informações. O entendimento desse conceito pode ser exemplificado por meio de dois diagramas.

O primeiro diagrama, ilustrado na Figura 3.1, é denominado diagrama de enlace causal e caracteriza-se por representar de uma maneira simples o comportamento de um sistema.

Nesse tipo de diagrama se destacam: (i) as variáveis, entidades ou elementos relevantes do sistema; (ii) a representação dos relacionamentos por intermédio de setas que indicam em que sentido uma variação no elemento causador gera variação no elemento que recebe a ação; e (iii) os atrasos, efeitos que se tornam muito perceptíveis após determinado tempo de espera.

Figura 3.1 – Diagrama de enlance casual (Fonte: ANDRADE, 1997).

Um enlace ou *feedback* é um conjunto circular de causas que têm sua propagação iniciada por um elemento que gera uma perturbação no sistema, havendo logo em seguida um efeito resultante, que no final acaba retornando também para este elemento causador da perturbação. Os *feedbacks* que assumem sinal positivo quando o efeito da perturbação no elemento originador segue o mesmo padrão de sentido inicial, são denominados enlaces de reforço. Já os *feedbacks* que se caracterizam por uma inversão do sentido original são denominados por enlaces de balanceamento. A Figura 3.2 exemplifica a questão dos *feedbacks* positivos e negativos, usando como referência um sistema de aquecimento controlado por termostato.

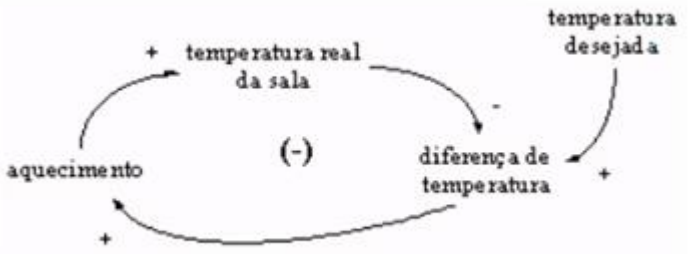


Figura 3.2 – Sistema de aquecimento controlado por termostato (Fonte: ANDRADE, 1997).

O segundo diagrama, denominado *diagrama de fluxo*, representa de forma mais elaborada o funcionamento dos sistemas, com maior grau de refinamento e símbolos maiores (vide Figura 3.3). Nesse diagrama os símbolos representam: (i) níveis, que correspondem a acumulações ou estoques dentro do sistema; (ii) fluxos, relacionados ao movimento de materiais e informações dentro do sistema; (iii) funções de decisão, que representam a forma como os fluxos são controlados, sendo usualmente definidos como políticas de gerenciamento; (iv)

escoamento e fonte, que marcam o início e fim de um fluxo; (v) variáveis, auxiliares para a realização de operações algébricas; e (vi) parâmetros, que correspondem à constante de ajuste para definição de objetivos de um sistema.

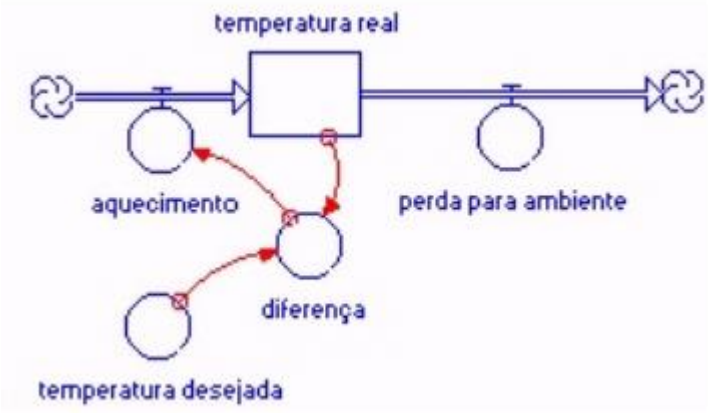


Figura 3.3 – Diagrama de fluxo de um sistema de aquecimento controlado por tesmostado (Fonte: ANDRADE, 1997).

Um dos principais modelos para a compreensão do pensamento ou abordagem sistêmica de problemas complexos é o dos níveis da realidade. Este modelo serviu como a base para conceituação de um método que permite a ampliação da compreensão de questões sistêmicas através do aprofundamento da percepção (BORGES, 2000). De acordo com Senge (1990, *apud* KASPER, 2000) as situações ou fenômenos da realidade podem ser explicados em termos de quatro níveis distintos, ilustrados na Figura 3.4 em analogia a um *iceberg*. Esses quatro níveis (eventos, padrões de comportamento, estrutura sistêmica e modelos mentais) atuam simultaneamente, porém com utilidades diferentes.

Figura 3.4 – Os níveis do pensamento sistêmico ilustrados pela teoria do *iceberg* (ANDRADE, 1997).

O nível dos eventos é a ponta perceptível aos envolvidos no sistema. Para que uma percepção não fique restrita ao nível dos eventos, é necessário analisar todas as tendências de longo prazo e buscar uma visualisação de pelo menos boa parte das implicações. O segundo nível de padrões de comportamento consiste numa análise do passado e, a partir dele, tentar definir caminhos e tendências para o futuro. Para o terceiro nível, busca-se analisar a estrutura sistêmica e explicar como os elementos influenciam-se mutuamente. O quarto nível influencia os demais na medida em que modelos mentais dos envolvidos influenciam o seu comportamento de forma a gerar estruturas sistêmicas da realidade.

A partir da utilização dos instrumentos ou modelos de funcionamento do pensamento sistêmico, que incluem a linguagem sistêmica e os níveis de pensamento sistêmico, SENGE *et al.* (1997, *apud* RIBEIRO, 2006), propõe um método para a compreensão e intervenção na realidade, através do inter-relacionamento entre seus elementos, que pode ser representado pelas etapas ilustradas na Figura 3.5.

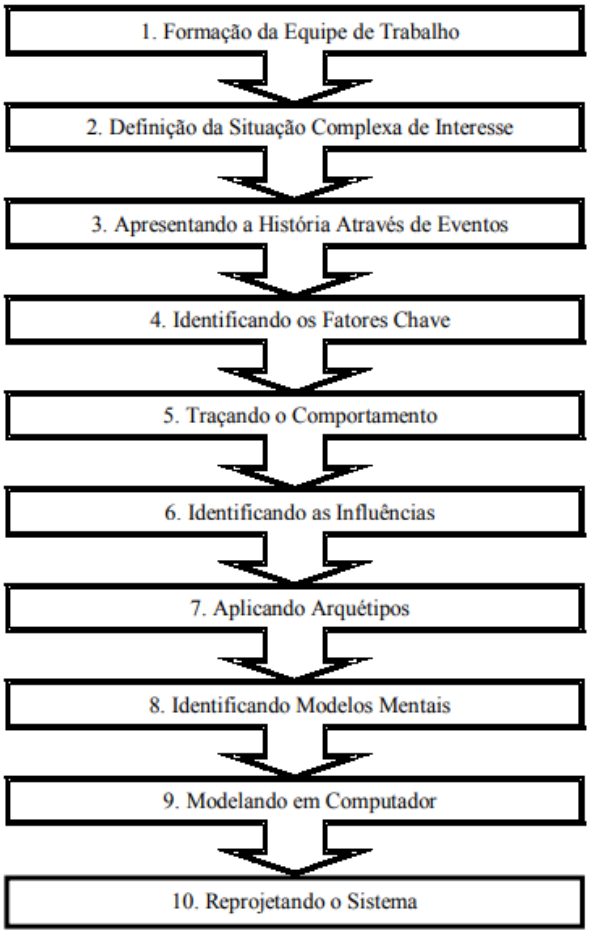


Figura 3.5 – Etapas para o desenvolvimento do método e aplicação do pensamento ou abordagem sistêmica (Fonte: BORGES, 2000).

3.2.2 Abordagem Sistêmica aplicada à Engenharia de Recursos Hídricos

Segundo Freitas e Kaetsu (2015), os sistemas complexos são caracterizados por situações dinâmicas nas quais os problemas mudam ao interagir com outros problemas. Representam uma situação para a qual é difícil formular as causas e consequências, uma vez que apresentam características de interdependência e multi-causalidades contínuas, circulares. Certos aspectos, vistos como causas, viram efeitos e vice-versa. Os sintomas são confundidos com o problema e as soluções podem produzir consequências inesperadas.

A abordagem sistêmica está intimamente relacionada à busca de solução de problemas complexos, à abstração ou simplificação desse problema de tal maneira que apenas sejam mantidas as informações mais relevantes para sua solução (PORTO, 2015).

A ideia de sistema como elementos que interagem e se influenciam, agregados em todos ou conjuntos complexos, é a essência do enfoque sistêmico. Essas características se aplicam à problemática da gestão de recursos hídricos e especificamente na avaliação de impactos na capacidade de geração de usinas hidrelétricas inseridas em bacias hidrográficas com grande diversidade de usos e usuários de água. Para representar esses processos, caracterizados como problemas complexos, dada uma série de possíveis interferências, pode-se utilizar a dinâmica de sistemas.

A dinâmica de um sistema, baseada fundamentalmente na teoria de *feedbacks* ou realimentação, pode ser descrita pela utilização de vários tipos de equações matemáticas e inequações (PORTO, 2002). Em grande parte dos sistemas que envolvem os recursos hídricos, a equação de balanço hídrico (variação de volume = entradas – saídas) está presente. Já as inequações incorporam os limites físicos do sistema, limites operacionais, restrições ou condicionantes.

Ainda segundo Porto (2002), a análise de sistemas em engenharia de recursos hídricos se vale basicamente de duas técnicas: (i) simulação do comportamento da realidade que eles representam, ou simulação matemática, e (ii) otimização dos processos decisórios que atuam sobre essa realidade.

As técnicas de simulação são mais gerais e intuitivas. A simulação computacional já foi consagrada como uma ferramenta de suporte à decisão, permitindo verificar o funcionamento de um sistema real em um ambiente virtual, considerando a variabilidade do mesmo e

demonstrando o que acontecerá na realidade de forma dinâmica (BORGES, 2000). Dessa forma, é possível visualizar e compreender o sistema real, bem como identificar as inter-relações existentes no mesmo.

Ainda segundo Borges (2000), os sistemas para os quais se justifica a utilização da simulação, são dinâmicos (seu comportamento pode variar ao longo do tempo), interativos (possuem *n* componentes que interagem entre si, afetando o comportamento do sistema) e complexos (o número de variáveis que interagem é muito grande e sua dinâmica precisa ser considerada). Para tais sistemas, a estocasticidade e natureza dinâmica são características que devem ser analisadas para definição de ações na realidade.

Uma das vantagens da simulação em relação a outras técnicas de apoio à tomada de decisão é justamente a observação da estocasticidade dos sistemas, que não é levada em conta quando os mesmos são representados por modelos analíticos/determinísticos. Law e Kelton (1991, *apud* BORGES, 2000) desenvolveram um método buscando facilitar o desenvolvimento de estudos de simulação. O método consta basicamente no gerenciamento de uma estrutura dividida em dez etapas, conforme apresentado na Figura 3.6.

A técnica de otimização é utilizada quando existe o interesse em otimizar o processo decisório de acordo com uma valoração estabelecida por uma função-objetivo, a qual estabelece formas de valoração dos resultados do processo decisório representado. Dentre as diversas alternativas de otimização, podem ser citadas a otimização por enumeração e a programação dinâmica.

A otimização por enumeração é utilizada quando é empregado um modelo de simulação para enumerar exaustivamente as alternativas decisórias, de modo a ser possível a identificação do ótimo, de forma aleatória ou utilizando técnicas iterativas de otimização. A programação dinâmica, por sua vez, é um procedimento de otimização aplicado a problemas com decisões sequenciais que tenham a característica de obedecer ao chamado Principio da Otimalidade. Este princípio permite que o problema sequencial seja decomposto em vários problemas aninhados, nos quais decisões devem ser tomadas. A ligação entre estes problemas é estabelecida por uma Função Valor-Ótimo que computa em cada etapa e estado do sistema o somatório dos retornos das decisões daquele ponto até o último estágio, supondo que as decisões ótimas sejam realizadas. Essa alternativa de otimização pode, pelos motivos apresentados, ser classificada como um procedimento sequencial e abrigar qualquer método.

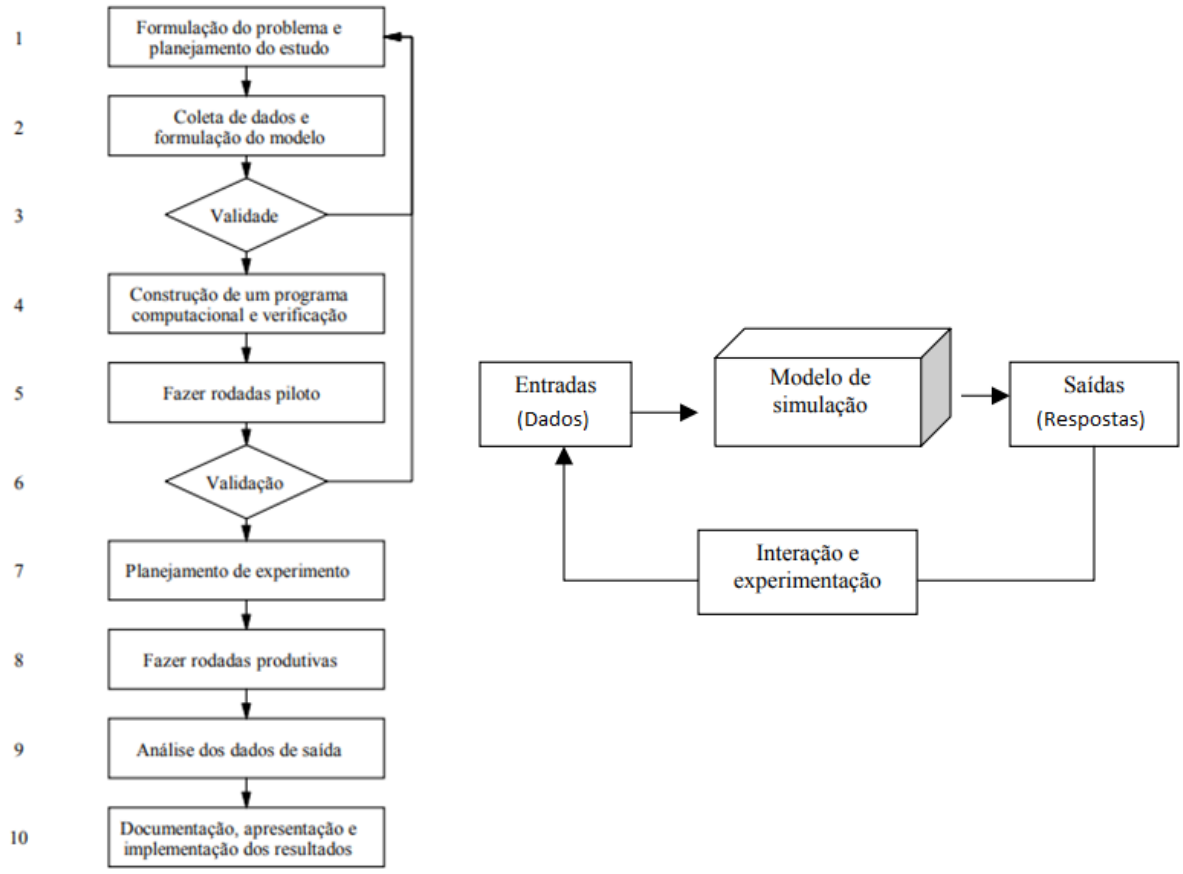


Figura 3.6 – Roteiro para realização de um estudo de simulação dentro da abordagem sistêmica (Fonte: LAW e KELTON, 1991 *apud* BORGES, 2000).

Por não ser um método, mas sim um procedimento, não existem programas generalizados para aplicar a programação dinâmica em qualquer circunstância, tendo o usuário que programar seu próprio algoritmo. Além disso, o mapeamento da Função Valor-Ótimo pode ser um trabalho extenuante, aumentando exponencialmente com o número de estruturas acrescentadas ao sistema. Apesar desses fatos, a programação dinâmica encontra grande aplicação em sistemas de recursos hídricos devido à natureza sequencial das decisões envolvidas e pelo fato de que poucas exigências são realizadas com relação à natureza do processo decisório, a não ser a que de ele obedece ao principio da otimalidade (PORTO, 2002).

A técnica de simulação não apresenta praticamente nenhuma exigência quanto à natureza do problema a não ser a de que ele possa ser formulado matematicamente. A programação dinâmica exige unicamente que se trate com um problema de decisões sequenciais que obedeça ao principio da otimalidade. Os métodos de otimização, por sua vez, apresentam

demandas mais detalhadas quanto à estrutura do problema, envolvendo programação linear e não linear.

A abordagem sistêmica, no que se refere à concepção do problema de recursos hídricos através da abstração dos aspectos mais relevantes, há muito vem sendo utilizada. A técnica mais empregada é, sem dúvida, a simulação matemática. Exemplos comuns disso são os modelos matemáticos chuva-vazão e de sistemas de recursos hídricos (PORTO, 2002).

O uso de técnicas de otimização é mais discreto, apesar de suas grandes possibilidades. No Brasil é prática normal do setor elétrico o uso de técnicas de programação dinâmica de programação linear para estudos de operação do sistema elétrico interligado, composto por um grande número de reservatórios, hidroelétricas e termoelétricas.

A análise sistêmica de recursos hídricos, em conjunto com técnicas de simulação e de otimização são potentes ferramentas de suporte à decisão que deverão ter uso cada vez mais disseminado na prática da engenharia de recursos hídricos, dando coerência ao trato de sistemas que tendem a ter a sua complexidade aumentada.

3.3 AVALIAÇÃO DAS DISPONIBILIDADES HÍDRICAS SUPERFICIAIS

Devido às diferentes condições geomorfológicas e climatológicas, a água se distribui de forma irregular, tanto no tempo como no espaço (NAGHETTINI, 1999). As variações sazonais e interanuais das vazões de um curso de água podem ser muito elevadas, fazendo com que quanto mais variável for o regime hidrológico, menor seja a disponibilidade dos recursos hídricos naturais.

Ainda segundo NAGHETTINI (1999), a distribuição espacial e temporal da precipitação, a velocidade e a direção dominante de deslocamento das tormentas sobre uma dada bacia hidrográfica, as variações temporais e espaciais das perdas por intercepção, evapotranspiração e infiltração, bem como as condições de armazenamento da umidade do solo, são exemplos do grande número de fatores interdependentes que podem influir na variabilidade das vazões de um curso de água. Essa variabilidade, sendo bastante complexa, faz com que as vazões de um curso de água, bem como outras variáveis hidrológicas, sejam consideradas variáveis móveis e aleatórias.

A caracterização do regime fluviométrico de uma determinada bacia hidrográfica geralmente é feita por meio da determinação dos indicadores de oferta hídrica natural e pela avaliação da

disponibilidade hídrica. Esses indicadores de oferta hídrica, que funcionam como agentes externos em um sistema complexo de engenharia de recursos hídricos, incluem basicamente e segundo Tucci (2002):

- *Vazão Média de Longo Termo*, que corresponde ao limite teórico superior do potencial de utilização em um curso de água, por ser a vazão que, se ocorresse de forma constante em uma dada seção fluvial, forneceria o mesmo deflúvio que o regime natural de enchentes e estiagens produz em determinado período de tempo.

- *Curva de Permanência de Vazões*, que representa a distribuição da frequência amostral das vazões registradas em dada seção fluvial e indica o percentual de tempo em que o regime do curso de água sustenta vazões maiores ou iguais a um valor de referência.

- *Vazões Mínimas de Referência*, que representam o regime de estiagem dos cursos de água ou servem de parâmetro para definição do valor de vazão passível de utilização em determinada região, desde que considerados os aspectos legais pertinentes.

- *Potencial de Regularização de Vazões*, que representa a relação entre volumes úteis de acumulação e respectivas vazões regularizadas, quando se considera a hipótese de implantação de barragens nos cursos de água.

As disponibilidades hídricas, por sua vez, são geralmente consideradas sob três abordagens:

- *Disponibilidade Hídrica Natural*, tratada no presente documento como *Oferta Hídrica Natural:* que representa a quantidade de água garantida pelos mananciais da natureza, considerando índices mínimos das respectivas capacidades de produção.

- *Disponibilidade Hídrica Legal*, tratada no presente documento como *Oferta Hídrica Legal*: representada pela regulamentação estabelecida pelos órgãos gestores de recursos hídricos e que determinam os limites máximos de captação do recurso água.

- *Disponibilidade Hídrica Real*, tratada no presente documento como *Disponibilidade Hídrica*: correspondente à água efetivamente disponível para consumo e utilização.

Ainda de acordo com Tucci (2002), um dos maiores desafios em hidrologia é caracterizar adequadamente o comportamento dos processos hidrológicos. Em muitos casos práticos, essa caracterização é qualitativa, interferindo no adequado gerenciamento dos recursos hídricos dentro de bases ambientalmente sustentáveis.

A quantificação dos processos hidrológicos depende, portanto, da observação de variáveis hidrológicas. Para a estimativa de tais variáveis, que possuem natureza estocástica e são responsáveis pela representação dos processos ao longo do tempo, torna-se necessária a existência de amostras confiáveis e representativas.

Em outras palavras, a caracterização do regime fluvial de determinada bacia hidrográfica está intrinsecamente ligada à disponibilidade de dados hidrometeorológicos, principalmente os que se referem à vazão líquida. Nos locais em que existe o monitoramento sistemático das vazões em trânsito nos cursos de água, com registros históricos suficientes e representativos para a obtenção de séries de vazões médias mensais, as vazões média e específica de longo termo e as vazões mínimas de referência podem ser facilmente obtidas. Da mesma forma, também podem ser determinados outros indicadores do regime hidrológico, como vazões máximas, curvas de permanência temporal e de potencial de regularização em reservatórios.

Nos locais que não dispõem de nenhum tipo de monitoramento ou que apresentam registros de dados insuficientes para permitir a caracterização da disponibilidade hídrica, torna-se necessária a aplicação de técnicas de regionalização de dados hidrológicos de outras bacias, consideradas hidrologicamente homogêneas em relação à região de interesse, para permitir a determinação dos indicadores de oferta hídrica e a caracterização do regime de vazões de seus cursos de águas. Segundo Pinheiro (2011), a homogeneidade pode ser considerada com base na semelhança do regime pluviométrico, do regime climatológico, do substrato geológico, da cobertura vegetal, do relevo e da tipologia de uso e ocupação do solo.

Segundo Tucci (2002), a regionalização hidrológica pode ser realizada em dada região para:

- Variáveis (precipitação média, vazões médias ou de enchente), com base em relações estabelecidas por meio de dados pontuais existentes.
- Funções (curva de intensidade x duração x frequência, curva de regularização de vazões), a partir de dados hidrológicos existentes.
- Parâmetros (de uma função ou modelo matemático), com base em sua relação com características físicas das bacias. Esse procedimento pode ser feito por meio de calibração do modelo matemático, ajustando-se os dados gerados aos dados observados.
- Indicadores regionais (vazão média específica de longo termo), que correspondem a valores médios de variáveis ou proporções que permitam uma rápida estimativa de uma

variável ou entendimento do seu comportamento.

Ainda segundo o referido autor e de acordo com Pinheiro (2011), a regionalização hidrológica envolve as seguintes etapas:

- Delimitação da área a ser estudada, que geralmente é definida por contornos geográficos ou hidrográfico.
- Obtenção de mapas geológicos, cartográficos, de vegetação e de uso e ocupação do solo da área de abrangência.
- Definição das variáveis dependentes e explicativas para regionalização (vazão, precipitação, evaporação, entre outras).
- Seleção dos dados de monitoramento das variáveis a serem regionalizadas, os quais devem ser suficientes e representativos.
- Análise de consistência dos dados de monitoramento e homogeneização de dados.
- Definição das funções regionais: relações regionais e definição das regiões homogêneas.
- Aplicação dos métodos de regionalização.

Diversos são os métodos empregados na regionalização hidrológica e sua seleção deve ser realizada em função da variável que se pretende transferir de uma dada região para outra, da disponibilidade de dados e das características das bacias hidrográficas em análise. Dentre os diversos métodos existentes podem ser citados (TUCCI, 2002 e PINHEIRO, 2011): proporcionalidade de áreas de drenagem; adimensionalização da curva de permanência de vazões médias mensais; balanço hídrico de longo termo de bacias hidrográficas; curvas que relacionam as variáveis hidrológicas de interesse; e, parâmetros físicos da bacia hidrográfica.

3.4 AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS

As águas de superfície (lagos, represas e cursos de água) e as águas subterrâneas (aquíferos) não são necessariamente recursos independentes, podendo haver, em muitos casos, ligações entre corpos de água superficial e aquíferos (FEITOSA e MANUEL FILHO, 2000). Essas ligações que permitem o fluxo entre ambos os sistemas, podem ocorrer no sentido dos cursos de água para os aquíferos e vice-versa, sendo decorrentes da permeabilidade do leito, da diferença da carga potenciomérica e da presença de fraturas nas rochas que os interligam.

Dessa forma, e na grande maioria dos casos, nos aquíferos aluviais a recarga tem origem fluvial nos períodos chuvosos, enquanto que o fluxo de base dos cursos de água é assegurado pelas águas subterrâneas nos períodos de estiagem ou seca. Além da quantidade, a qualidade da água subterrânea pode ser afetada pela infiltração de substâncias diversas e também por água superficial contaminada (VON SPERLING, 2005).

Monitorando-se a vazão e/ou os níveis de água nas zonas de contato entre os aquíferos e os cursos de água superficial, pode-se mensurar e avaliar a recarga (entrada) ou descarga (saída) da água em cada sistema. A coleta e análise de parâmetros físico-químicos permitem a avaliação da qualidade das referidas águas.

Independentemente da existência ou não de ligações entre os sistemas de água superficial e subterrânea, o planejamento e gestão dos recursos hídricos deve sempre incluir ambos, incorporando cada um deles no sistema global de acordo com suas características específicas.

Ainda segundo Feitosa e Manuel Filho (2000), embora pareça óbvio que as águas subterrâneas devam ser analisadas e utilizadas em conjunto com as águas superficiais, muitas vezes existe certa relutância em sua inclusão no planejamento e gestão de recursos hídricos, que incluem as atividades relacionadas ao planejamento de usinas hidrelétricas, por exemplo. As razões, segundo Wiener (1972), estão fundamentadas no alto consumo de energia para explotação desse recurso em grandes profundidades; na necessidade de disponibilidade de extenso período de dados de monitoramento para sua caracterização, dados estes bastante raros; na exigência de pessoal qualificado para planejamento e operação de sistemas de explotação; na dificuldade de previsão do comportamento quantitativo e qualitativo dos aquíferos; e na destinação prioritária para o consumo humano ou abastecimento público.

Entretanto, Bier (1979) aponta uma série de argumentos que desmitificam o uso das águas subterrâneas. Tais argumentos se fundamentam principalmente nas características das bacias hidrográficas, que podem potencializar ou não o uso dos recursos disponíveis. Um desses argumentos está associado à exploração mineral, cujas atividades de lavra interferem nos aquíferos de água subterrânea, disponibilizando recurso complementar às águas superficiais, para utilização nas áreas entorno (abastecimento humano, industrial, agrícola, etc.).

Nesses casos, é importante destacar que ambos os recursos devem ser utilizados de acordo com suas características específicas. No caso específico das águas subterrâneas, deve-se considerar principalmente a localização; o fluxo e a disponibilidade do recurso; a

variabilidade sazonal e anual; a energia utilizada na sua explotação; a qualidade da água na fonte; os impactos em problemas de drenagem; o potencial impacto negativo na disponibilidade hídrica superficial; a subsidência de terras; os dados de monitoramento; o desenvolvimento gradual de sua explotação e os aspectos legais e institucionais relacionados à sua utilização (BIER, 1979).

Para caracterizar uma determinada bacia hidrográfica do ponto de vista hidrogeológico e, consequentemente, avaliar possíveis interferências das águas subterrâneas com as águas superficiais, alguns conceitos básicos devem ser conhecidos. Esses conceitos, citados em Feitosa e Manuel Filho (2000), relacionam-se às reservas renováveis, explotáveis, permanentes e totais, as quais funcionam como agentes externos em um sistema complexo de engenharia de recursos hídricos.

As **reservas renováveis**, ou reguladoras, representam a quantidade de água livre, armazenada no sistema aquífero, que é renovada a cada período anual, correspondendo à recarga deste sistema. Sendo assim, elas são submetidas ao efeito do ritmo sazonal ou interanual das precipitações e, em termos hidrológicos, representam o fluxo de base de uma determinada bacia hidrográfica.

Para resguardar a condição reguladora do aquífero, emprega-se o conceito de **reservas explotáveis**, ou recursos, para definir a quantidade máxima de água que poderia ser retirada de um manancial subterrâneo sem causar qualquer tipo de interferência indesejável.

As **reservas geológicas**, também chamadas permanentes, seculares ou profundas, se constituem no volume de águas acumuladas no aquífero em função da porosidade efetiva e do coeficiente de armazenamento do solo, e cujos valores médios independem da flutuação sazonal da superfície piezométrica, ou seja, da reserva renovável.

As **reservas totais**, ou naturais, por sua vez, fecham a conceituação do tema ao denotarem a somatória de reservas geológicas e reservas renováveis, constituindo, assim, a totalidade de água existente em um sistema ou unidade aquífera.

Portanto, em termos naturais, são as reservas renováveis as responsáveis pela manutenção dos cursos de água, podendo ser afetadas pelo sistema de rebaixamento de poços de abastecimento ou das cavas em áreas de mineração, implicando em impactos nas disponibilidades hídricas superficiais, sejam eles positivos ou negativos. São estas reservas

que mantêm os rios perenes durante a estiagem, configurando o chamado fluxo ou vazão de base, e sua estimativa permite conhecer o limite de captação de um curso de água.

Além dos conceitos citados, para embasar a caracterização da dinâmica de circulação das águas subterrâneas em dada bacia, deve-se considerar o caráter litológico predominante, o comportamento hidrodinâmico e os tipos de permeabilidade (primária e secundária) do solo. Também devem ser identificados os diferentes aquíferos e aquicludes, os quais caracterizam unidades hidrogeológicas, e que, por sua vez, se agrupam em sistemas hidrogeológicos.

Essa classificação, que segue os padrões e premissas apresentados por Beato *et al.* (2005) e Mourão (2007), as quais se baseiam na definição de Rebouças (1994) e Souza (1995), utilizam o termo *Sistema Aquífero* para designar um conjunto formado por uma ou mais unidades litoestratigráficas que apresentam condutividade hidráulica, características hidrodinâmicas, condições de recarga, circulação, descarga e de qualidade das águas relativamente semelhantes. Souza (1995) ainda emprega o termo *Unidade Aquífera* para caracterizar a ocorrência de um ou mais tipos predominantes de rocha portadora de água, associado a uma unidade geológica específica.

3.5 AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE EROSÃO E DO ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIOS

Em estudos, projetos e operação de obras fluviais é extremamente importante o conhecimento da sedimentologia, disciplina que estuda os processos de erosão, transporte e deposição dos sedimentos provenientes de fontes naturais ou ocasionados por atividades antrópicas. Essas variáveis ou fatores funcionam como agentes externos em um sistema complexo de engenharia de recursos hídricos.

Segundo Paiva e Paiva (2000), tais estudos se tornam importantes principalmente devido ao fato de que a degradação das bacias hidrográficas pela ação antrópica, como os desmatamentos desordenados, o uso irracional do solo pela agricultura, pastoreio, obras civis, etc., associada aos fenômenos naturais de precipitação, induzem a produção de quantidade significativa de sedimentos, muito maiores que aquela produzida em centenas de anos, em condições de equilíbrio natural. Tais sedimentos, transportados pelos cursos de água que drenam a região, alteram significativamente sua qualidade, promovem seu assoreamento, bem como impactam nos custos das obras de aproveitamento dos recursos hídricos, com reflexos na sua operação e gestão.

Segundo Carvalho (2008), dentre os principais agentes dinâmicos naturais que contribuem para moldar a configuração da superfície terrestre, atuando em conjunto ou isoladamente, é dada maior ênfase à água. Isto porque em decorrência do impacto das gotas da chuva no solo, do escoamento superficial difuso, do escoamento superficial concentrado nos talvegues e nos cursos de água, esse agente contribui significativamente para os processos erosivos nos terrenos das bacias hidrográficas.

Os processos erosivos, que correspondem à primeira etapa do processo de sedimentação, são grandemente influenciados pelas atividades antrópicas, que trabalham em conjunto com os agentes naturais. Dentre as principais atividades antrópicas que atuam nos processos erosivos podem ser citadas: mineração; construção de estradas; expansão da malha urbana, com implantação de loteamentos em locais com características geológico-geotécnicas não apropriadas; preparação de terras para uso agrícola; pastoreio intensivo; desmatamento e construção de obras hidráulicas (MORRIS e FAN, 1997 e CARVALHO, 2008).

A segunda parte do processo de sedimentação está ligada ao transporte dos sedimentos pelo escoamento, sendo este intimamente correlacionado com as características físicas e climáticas da região, com as características geomorfológicas do curso de água, com a forma, tamanho e textura do material erodido, com as condições de uso do solo e com as forças exercidas pelo escoamento. Quando tais forças perdem capacidade de deslocar as partículas de sedimento, ocorre a fase de deposição. Os depósitos formados nesta fase podem ser de pequeno, médio ou grande porte, permanentes ou transitórios, como o assoreamento (CARVALHO, 2008).

A formação de um reservatório a partir da construção de um barramento altera o equilíbrio hidráulico e sedimentológico do curso de água (ANEEL, 2000). A desaceleração da corrente líquida na entrada do lago dá início ao processo de deposição das partículas transportadas pelo fluxo, as quais, adentrando ao reservatório, provocam seu assoreamento gradual. De maneira geral, as partículas mais grossas de sedimentos tendem a se depositar na entrada do reservatório e as partículas mais finas, que são transportadas para seu interior, se depositam ao longo de toda a sua extensão ou são parcialmente expelidas pelos órgãos extravasores.

Com o passar do tempo e o aumento do assoreamento do reservatório, a capacidade de armazenamento diminui, a influência de seu remanso a montante aumenta, as velocidades de escoamento no percurso também aumentam e maior quantidade de sedimentos passa a escoar para jusante. Entretanto, o assoreamento do volume compreendido entre o fundo do

reservatório e a soleira da tomada de água de aproveitamentos hidrelétricos ou a cota do dispositivo de proteção desta, pode comprometer a geração de energia (ANEEL, 2000).

Diante desses fatos, os aspectos sedimentológicos assumem grande importância na operação de uma determinada usina, uma vez que o aporte e a consequente deposição de sedimentos ao longo de seu reservatório podem causar: (i) perda de capacidade de armazenamento e redução de seu potencial de regularização; (ii) problemas de obstrução parcial ou total das principais estruturas hidráulicas, dependendo do posicionamento das mesmas; e, (iii) nos casos em que os sedimentos passam a ser aportados ao canal de adução, máquinas e outros equipamentos podem ser danificados.

Portanto, torna-se fundamental caracterizar o processo erosivo dos terrenos das bacias hidrográficas, realizar estimativas preliminares de produção e transporte de sedimentos, bem como acompanhar o processo de assoreamento dos reservatórios de usinas hidrelétricas nelas inseridas.

A quantificação da perda de solos ou do processo erosivo que dá origem ao processo de assoreamento em reservatórios não constitui tarefa simples, pois depende da consideração de: fatores controladores caracterizados por forte variabilidade espacial e temporal; raciocínio baseado no caráter do que sobra e não do que de fato reinava no momento em que se deu a perda dos solos; e, consequentemente, do uso de valores médios para representar parâmetros de caráter diferenciado numa única equação integradora.

Neste sentido, para realizar uma avaliação quantitativa da perda de solo de uma determinada bacia hidrográfica, ou seja, para caracterizar a sua produção de sedimentos, podem ser empregadas diversas abordagens, as quais permitam a integração de várias técnicas, como, por exemplo, a análise de cartografia multitemporal e o uso da equação universal de perda de solo (WISCHMEIER e SMITH,1978), sob a forma revisada por Bertoni e Lombardi Neto (1985).

A RUSLE, como é denominada a equação universal da perda de solo, apresenta a estimativa desse parâmetro como função do produto de seis variáveis (fatores controladores da erosão), sendo quatro delas (R, K, L, S) relacionadas a condições naturais e duas (C, P) a condições antrópicas, tal como indicado na Tabela 3.1.

Para avaliação do processo de assoreamento dos reservatórios podem ser empregadas metodologias baseadas em formulações empíricas, que estimam a produção de sedimentos na

bacia hidrográfica, ou em levantamentos topobatimétricos dos reservatórios, cujos dados permitem determinar o volume de sedimentos afluente e cuja eficiência de retenção pode ser estimada aplicando métodos também empíricos como os das curvas de *Churchill* e *Brune*, método da redução empírica de área de Bortland e Miller, entre outros (MORRIS, 1997; ANEEL, 2000; GARCIA, 2007).

Tabela 3.1 – Termos da equação de perda de solo: RUSLE (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1985).

Termo	Unidade	Explicação
E	$t.ha^{-1}.ano^{-1}$	Perda de solo por unidade de superfície
R	$MJ.mm.h^{-1}.ha^{-1}.ano^{-1}$	Fator erosividade da chuva, que expressa a energia do impacto das gotas. Calculado, originalmente, com base na intensidade das chuvas em períodos de 30 min.
K	$t.\ MJ^{-1}.mm^{-1}.h$	Fator erodibilidade do solo, que expressa o potencial de erosão do solo principalemente em função de suas características texturais,
L	adimensional	Fator comprimento de rampa, que expressa maior erodibilidade quanto mais longa for a rampa. Associado ao fator S para composição do Fator Topográfico.
S	adimensional	Fator declividade, que expressa maior erodibilidade quanto maior for a declividade. Associado ao fator L para composição do Fator Topográfico.
C	adimensional	Fator cobertura do solo e manejo, que expressa o quanto o tipo de uso do solo expõe a área à erosão.
P	adimensional	Fator prática conservacionista, que expressa a importância da proteção oferecida pelas práticas conservacionistas implantadas.
E = R.K.L.S.C.P		

3.6 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO HIDROENERGÉTICA

A avaliação do potencial de geração de uma usina hidrelétrica depende basicamente da disponibilidade e variabilidade hídrica superficial, de algumas características físicas do terreno, ou seja, da altura de queda, e de parâmetros relacionados às estruturas de geração (rendimento das máquinas hidráulicas).

Para tornar mais assertiva e viável tal avaliação, muitas vezes são empregadas técnicas de simulação matemática, cujos modelos dependem de uma série de parâmetros (PEREIRA, 2015). No âmbito dessa avaliação hidroenergética devem ser considerados conceitos básicos (SCHREIBER, 1977; ELETROBRAS, 2000), sendo alguns deles apresentados na sequência.

Vazão de Engolimento, que corresponde à vazão afluente necessária para geração da potência instalada e que pode ser calculada pela Equação 3.1:

$$Qe = \frac{P\max}{9{,}81 \times H \times \eta} \tag{3.1}$$

em que *Qe* é a vazão de engolimento (m³/s); P_{max} a potência máxima instalada no empreendimento (kW); *H* a altura de queda (m); e η o rendimento dos equipamentos (adimensional).

Déficit na Geração, calculado como a relação entre a vazão média afluente ao reservatório da usina e a vazão máxima de engolimento. A vazão média turbinada e o Déficit na Geração são calculados pelas Equações 3.2 e 3.3.

$$Qm = \left(\frac{\sum_{1}^{n} Q}{n} \right) \tag{3.2}$$

$$Def = 1 - \frac{Qm}{Qe} \tag{3.3}$$

nas quais *Qm* corresponde à vazão média turbinada; *n* ao número de meses no período de análise; *Q* é igual a vazão afluente quando esta for menor ou igual a *Qe*, e igual a *Qe* quando a vazão afluente for maior que *Qe*; e, *Def* corresponde ao déficit na geração.

Energia Firme, que correspondente à máxima produção contínua de energia que pode ser obtida por uma determinada usina, considerando o período crítico de vazões registrado em todo o histórico de dados disponível. Quando as usinas não possuem reservatório de regularização de vazões e, portanto, apresentam altura de queda fixa, o cálculo pode ser feito por meio da Equação 3.4.

$$E_f = \mathrm{P}máx\,(1 - \mathrm{Def}) \tag{3.4}$$

em que E_f corresponde à energia firme no período (kWh); *Pmáx* à potência máxima instalada (kWh); e, *Def* ao déficit na geração.

Energia Garantida, correspondente à máxima produção de energia que pode ser mantida por determinada usina ao longo dos anos. Considerando-se a ocorrência de cada uma das possibilidades estatísticas de sequência de vazões e admitindo o risco de não atendimento de 5%, esta variável pode ser estimada como 95% da Energia Firme.

Energia Assegurada, calculada a partir da Energia Garantida, subtraindo-se a taxa equivalente de indisponibilidade forçada, consumo próprio e reserva de potência. Essa variável é calculada como 0,95* Energia Garantida.

Fator de Capacidade, que indica a porcentagem de energia gerada frente à capacidade total de geração.

Impacto na Geração Energética, que corresponde à diferença entre as energias asseguradas decorrentes da simulação de cenários distintos de vazões afluentes.

A potência bruta disponível no sistema de geração de uma determinada usina pode ser obtida pela Equação 3.5, variante da Equação 3.1 e dada pela Equação 3.5.

$$Pot_{\mathrm{b}} = \frac{\gamma \mathrm{QH}}{1000} \tag{3.5}$$

em que Pot_b corresponde à potência bruta (kW), g à aceleração da gravidade (9,81 m/s²), Q à vazão afluente (m³/s), H representa altura de queda bruta (m) e γ o peso específico da água (kgf/m^3).

O rendimento total da instalação ($\eta_{global-instal}$) é obtido em função da potência gerada para uma determinada vazão e da potência bruta disponível (Equação 3.6).

$$\eta_{global-instal} = \frac{Pot_{med}}{Pot_b} 100 \tag{3.6}$$

O rendimento mecânico da instalação (η_{mec}) é obtido em função do rendimento do gerador (usualmente estimado em 95%) e da perda de carga do sistema hidráulico (Equação 3.7).

$$\eta_{mec} = \frac{\eta_{mec}}{0{,}95(H - \Delta h / H)} 100 \tag{3.7}$$

Para determinar a queda líquida das usinas, associada à perda de carga no sistema adutor, pode-se empregar a Equação 3.8, que, no entanto, pode ser simplificada para a Equação 3.9. Essas equações permitem o cálculo do coeficiente de perda de carga do sistema hidráulico ou de adução a partir de dados previamente levantados.

$$\Delta_h = \frac{8 f Q^2 L}{\pi^2 g D^5} \tag{3.8}$$

em que *f* representa o fator de atrito ou perda de carga (adimensional); *Q* corresponde a vazão (m^3/s); *L* representa a extensão da tubulação incluindo singularidades (m); *g* é a aceleração da gravidade (9,81 m/s^2); e *D* é o diâmetro da tubulação (m).

$$\Delta_h = kQ^2 \tag{3.9}$$

sendo,

$$k = \frac{8 f L}{\pi^2 g D^5} \tag{3.10}$$

3.7 AVALIAÇÃO DA PERDA DE CARGA EM TUBULAÇÕES

A perda de carga constitui-se na redução da energia dinâmica do fluido devido à fricção das partículas do mesmo entre si e/ou contra as paredes da tubulação ou canal que o conduz. Segundo Porto (2006), em qualquer tipo de escoamento, forçado ou livre, as leis de distribuição de velocidade permitem o cálculo da resistência oferecida ao fluido pela superfície sólida que o cerca, ou seja, permitem a estimativa da perda de energia ou perda de carga.

As instalações de transporte de água sob pressão ou gravidade, de qualquer porte, são constituídas por tubulações montadas em sequência, de eixo retilíneo, unidas por acessórios de natureza diversa, como válvulas, curvas, derivações, registros ou conexões de qualquer tipo e, eventualmente, por máquinas hidráulicas, como bombas ou turbinas (PORTO, 2006). Nos trechos retilíneos, de diâmetro constante e sob a influência do regime de escoamento permanente, ocorre perda de carga unitária e constante, denominada perda de carga distribuída. Já nos trechos em que se observa presença de qualquer um dos acessórios citados anteriormente, pode ocorrer alteração do módulo ou direção da velocidade, bem como de pressão. Essas alterações promovem turbulência no escoamento, gerando perdas de carga localizadas.

A determinação da perda de carga em tubulações, que funciona como um agente interno num sistema complexo de engenharia de recursos hídricos, é de fundamental importância para que se possa projetar corretamente um sistema hidráulico. Esse procedimento é válido para redes de distribuição de água, para sistemas adutores de usinas hidrelétricas, indústrias, etc.

É comum que o dimensionamento desses sistemas siga um roteiro onde o coeficiente de perda de carga seja arbitrado em função do tipo de material utilizado. Atualmente, existe uma tendência na utilização de materiais tais como o PVC, PPR, fibra de carbono, além do tradicional uso de tubos de aço carbono e de ferro fundido. Apesar da evolução no uso de diferentes materiais, ainda hoje a maior parte dos sistemas adutores de água, tanto para abastecimento urbano, quanto para alimentação de sistemas de irrigação e sistemas de adução de usinas hidrelétricas, são construídos em aço carbono. Nesses casos, é comum adotar uma *sobre espessura* da ordem de 1 mm no dimensionamento do diâmetro dos mesmos. Na medida em que o tempo de operação do sistema avança, essa *sobre espessura* será consumida em função do processo ativo de corrosão na tubulação (ANDRADE, 2000 e CINADEVILA, 2014).

De acordo com Andrade (2000), o efeito da corrosão em tubulações ocupa um espaço equivalente a um volume de três a dez vezes o volume ocupado anteriormente pelo material corroído. Segundo Cinadevila (2014), o efeito equivale a uma expansão que alcança até oito vezes o volume inicial do material afetado. Tal fato indica que após um tempo de utilização do tubo, em que a *sobre espessura* seja consumida pelo processo de corrosão, pode-se alcançar uma rugosidade de até 8 mm na tubulação e uma diminuição equivalente a cerca de 16 mm no diâmetro original. Para tubulações de grandes diâmetros essa rugosidade não é significativa; entretanto, para tubulações de aço de pequenos diâmetros (entre 100 mm e 200 mm) esses valores de rugosidade podem implicar em uma redução significativa da seção de escoamento, podendo até mesmo obstruir parcial ou totalmente o escoamento.

As principais equações utilizadas para o cálculo da perda de carga (Δ_h) em tubulações são as de Hazen-Williams (Equação 3.11) e de Darcy-Weisbach (Equação 3.11).

$$\Delta_h = \frac{10{,}64\ Q^{1{,}85}\ L}{C^{1{,}85} D^{4{,}87}} \tag{3.11}$$

$$\Delta_h = f\frac{V^2\ L}{D\ 2g} = \frac{8fL}{\pi^2 g D^5} Q^2 \tag{3.12}$$

nas quais, Δ_h representa a perda de carga em metros de coluna d'água (mca), Q é a vazão (m^3/s); L é a extensão da tubulação (m); C é coeficiente de Hazen-Williams (adimensional); D corresponde ao diâmetro da tubulação (m); V a velocidade média do escoamento (m/s); g é a aceleração da gravidade (9,81 m/s^2); e f o fator de atrito ou perda de carga de Darcy-Weisbach.

O fator *f* é função da rugosidade relativa (e/ D) do tubo e do número de Reynolds (Re), calculado pela Equação 3.13:

$$\mathrm{Re} = \frac{VD}{\nu} \tag{3.13}$$

em que ν é a viscosidade cinemática da água (m/s^2).

A equação de Hazen-Williams (HW) é de origem experimental e se aplica apenas nos casos em que se trabalha com a água como fluido em transporte (LION, 1998; BROWN, 2002).

A equação de Darcy-Weisbach (DW) está relacionada ao regime de escoamento caraterizado pelo Número de Reynolds. Essa equação permite o cálculo da perda de energia potencial a partir da velocidade do fluido e do fator de perda de carga *f*, que leva em consideração a viscosidade do fluido e a rugosidade relativa da tubulação e pode ser empregada para diversos tipos de fluidos (LION, 1998; BROWN, 2002).

Diante do exposto, para se avaliar a perda de carga em sistemas condutores de água é fundamental se conhecer os valores de *C* (equação de Hazen–Williams) e de *f* (equação de Darcy-Weisbach), os quais representam os coeficientes que permitem estimar a influência da superfície dos tubos sobre o escoamento. Entretanto, esses coeficientes podem variar em função do tempo devido à ação do envelhecimento do material, ocasionado pela corrosão e/ou deposição de material no interior das tubulações, ao longo de sua operação.

A evolução da corrosão depende de vários fatores, os quais variam desde o potencial hidrogeniônico da água (pH) até a quantidade de matéria orgânica ou outro material disponível e em suspensão no fluxo.

O USDA (1950, *apud* AZEVEDO NETO 1961) apresentou, na forma de ábacos, a evolução dos valores do coeficiente *C* em sistemas de abastecimento de água, ao longo do tempo e em função do pH da água, mediante medições de campo e do ensaio de trechos de tubulações. Tais ábacos são ilustrados nas Figuras 3.1 e 3.2.

Embora AZEVEDO NETO (1961) tenha levantado apenas a evolução do coeficiente *C*, é possível fazer uma conversão desses valores para o coeficiente de perda de carga ou atrito (*f*), utilizado nas equações de Darcy-Weisbach, de forma a se obter uma curva de evolução da rugosidade da superfície interna da tubulação (e) em função do tempo.

Para tanto devem ser igualadas as equações de Hazen-Williams (Equação 3.11) e de Darcy-Weisbach (Equação 3.12), obtendo-se, assim, o valor do coeficiente f em função do coeficiente C. Posteriormente, pode-se determinar a rugosidade relativa (e) superficial das tubulações, valendo-se dos dados citados e do Diagrama de Moody (Figura 3.7).

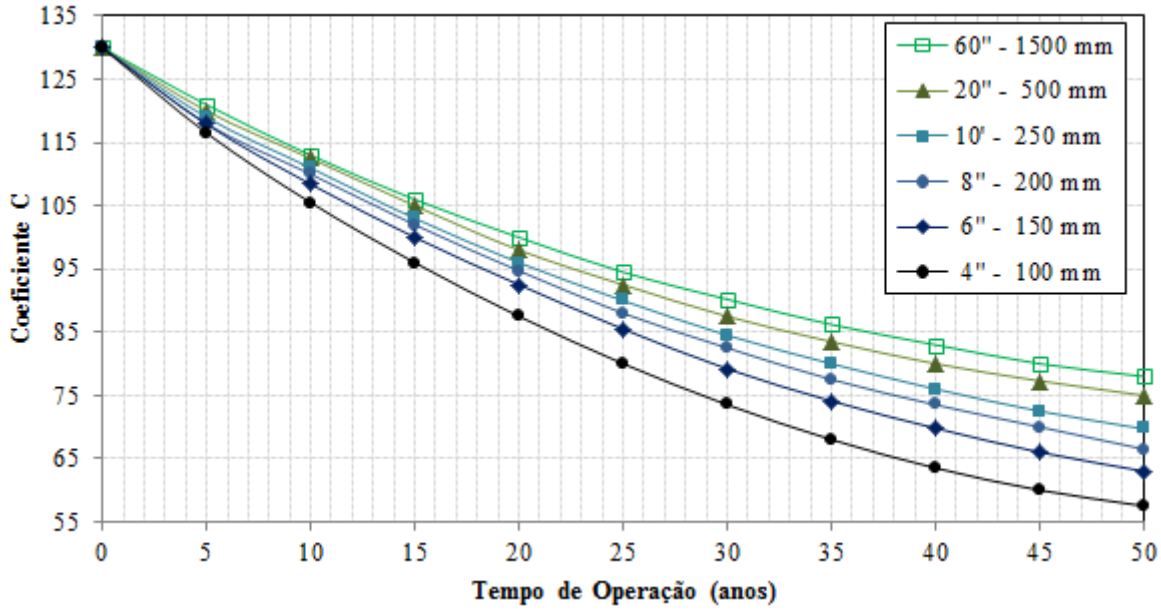
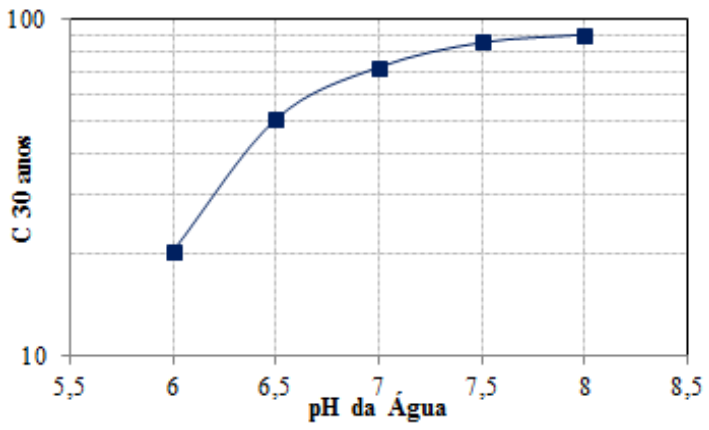


Figura 3.7 – Curva de evolução do coeficiente de perda de carga de Hazen-Williams em uma tubulação forçada (USDA, 1950 *apud* AZEVEDO NETO, 1961).

pH da Água	Valor de C	% da Capacidade Inicial
6,0	20	15
6,5	52	40
7,0	72	55
7,5	85	65
8,0	91	70



$$C_{30anos} = -16{,}86.pH^2 + 271.pH - 998{,}57$$

Figura 3.8 – Variação do Coeficiente de Hazen-Williams (C) em tubulações de ferro fundido para 30 anos de uso em função do PH da água (AZEVEDO NETO, 1961).

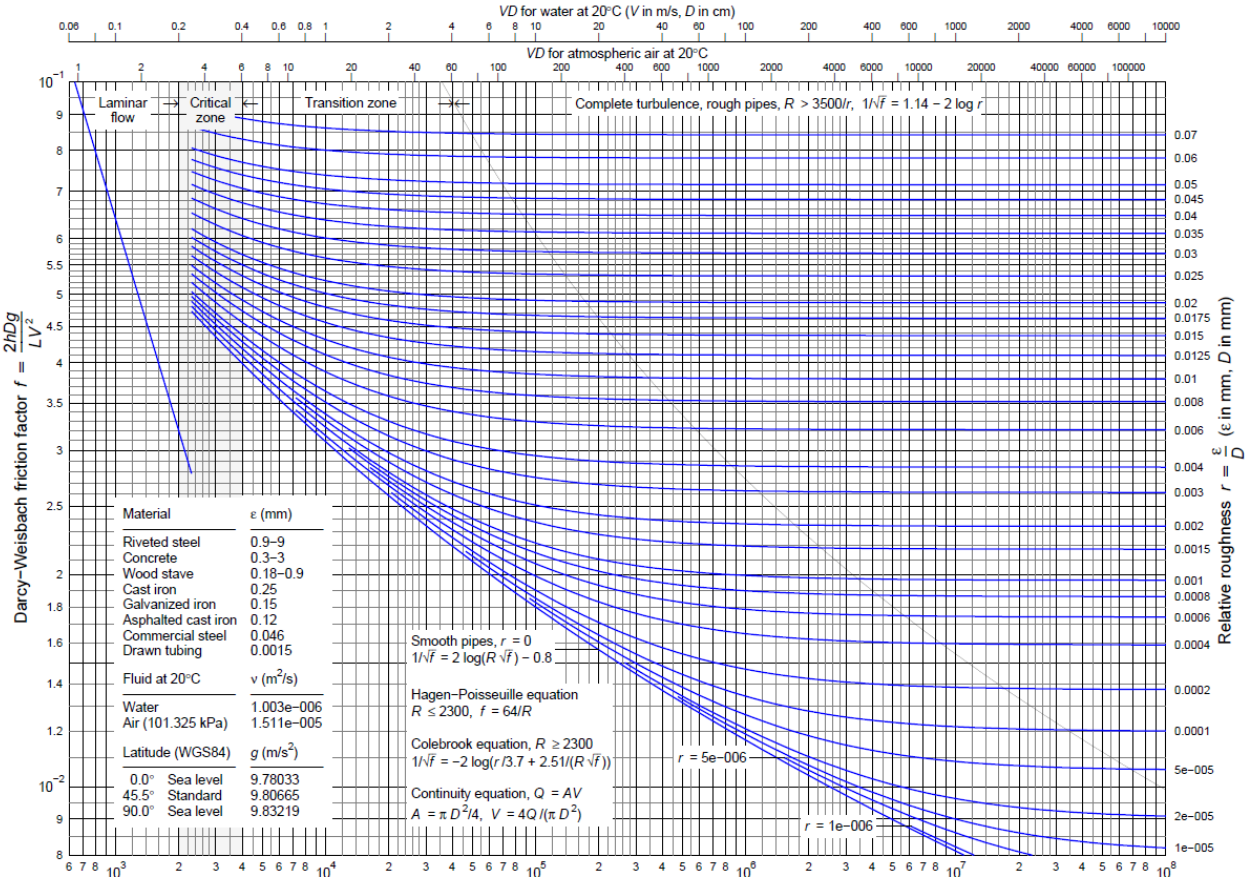


Figura 3.9 – Ábaco de Moody (MOODY, 1944).

Pode-se também, levando-se em consideração o número de Reynolds (Re), utilizar equações iterativas para o cálculo da rugosidade relativa, tal como apresentado por Çoban (2012). Destacam-se, nesse caso: as equações de Haaland (Equação 3.14) e Moody (Equação 3.15), citadas em Moody (1944); Nikuradse (Equação 3.16), citada em Andrade e Carvalho (2001) e Rao e Kumar (2006); e a equação de Colebrook-White (Equação 3.17), citada em Babajimopoulos e Terzidis (2013).

Equação de Haaland $$\frac{1}{f} = -1{,}8\log\left[\left(\frac{\left(\frac{e}{D}\right)}{3{,}7}\right)^{1{,}11} + \left(\frac{6.9}{Re}\right)\right] \quad (3.14)$$

Equação de Moody $$f = 5{,}5\text{x}10^{-3}\left[1 + \left(2\text{x}10^{4}\left(\frac{e}{D}\right) + \frac{10^{6}}{Re}\right)^{\left(\frac{1}{3}\right)}\right] \quad (3.15)$$

Equação de Nikuradse $$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1{,}74 - 2\log\left(\frac{2e}{D}\right) \quad (3.16)$$

Equação de Colebrook-White $$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left(\frac{e}{3{,}7D} + \frac{2{,}51}{Re\sqrt{f}}\right) \quad (3.17)$$

nas quais *e* representa a rugosidade do tubo.

Segundo Porto (2006), a equação de Colebrook-White, que deve ser resolvida de maneira iterativa, apresenta o melhor ajuste para a determinação do coeficiente *f*. Brkić (2011) afirma, no entanto, que para ter uma convergência de 0,01% nos resultados são necessárias ao menos sete iterações. Esse mesmo autor apresenta os erros relativos máximos obtidos pela aplicação de um grupo de equações propostas por diversos outros autores, com Re variando entre $1{,}0x10^{6}$ e $1{,}0x10^{8}$, para determinação do coeficiente de perda de carga *f*. Tais resultados são apresentados na Tabela 3.2.

Por outro lado, segundo o mesmo autor, a defasagem entre os valores de *f* obtidos pela equação de Nikuradse (3.16) e de Colebrook-White (3.17) é inferior a 1%, fato que permite que a equação de Nikuradse seja adotada na determinação do coeficiente *f* em diversos estudos de caso.

De acordo com DeBerry *et al.* (1982), vários fatores influenciam a evolução da alteração da rugosidade das tubulações. Entre estes se destacam alguns fatores inerentes ao projeto, tais como a forma de construção e de operação, temperatura local, tipo de escoamento, pH da água, alcalinidade, tipo de material utilizado, oxigênio dissolvido, etc.

O pH da água tem influência direta sobre o processo de evolução da corrosão da superfície das tubulações. A avaliação desse processo é uma tarefa difícil, uma vez que ao longo do tempo o pH da água varia em função de diversos fatores, muitos deles relacionados às interferências antrópica que atingem as vazões afluentes às redes de água, entre outros aspectos.

Conforme citado anteriormente, Azevedo Neto (1961) apresentou um estudo sobre a variação do coeficiente C em tubulações de ferro fundido com até 30 anos de uso, em função do pH da água (Figura 3.8). A confrontação desses dados com valores do coeficiente C de uma tubulação pode indicar qual o pH médio a que o sistema esteve submetido ao longo do tempo. Da mesma forma, por meio da relação estabelecida entre os valores do coeficiente C e os valores de f, pode ser proposta uma equação para avaliar essa perda de carga não só em função do pH e tempo de operação, mas também do diâmetro da tubulação.

Tabela 3.2 – Erros percentuais máximos obtidos por diversas equações empíricas utilizadas na determinação do coeficiente de perda de carga f (BRKIĆ, 2011).

Autor	Equação	Erro Máximo %	(e/D)	(Re)
Buzzelli (2008)	$\frac{1}{\sqrt{f}} = B_1 - \left(\frac{B_1 + 2.log_{10}\left(\frac{B_2}{Re}\right)}{1+\frac{2,18}{B_2}}\right)$ com $B_1 = \frac{(0,777.\ln(Re)) - 1,41}{\left(1+1,32.\sqrt{\frac{e}{D}}\right)}$ e $B_2 = \frac{e}{3,7.D}.Re + 2,51.B_1$	-0,1345	$7,5x10^{-2}$	1×10^8
Serghides 1 (1984)	$f = \left(S_1 - \frac{(S_2 - S_1)}{(S_3 - (2.S_2) + S_1)}\right)^2$ com $S_1 = -2log_{10}\left(\frac{e}{3,7D} + \frac{12}{Re}\right)$, $S_2 = -2log_{10}\left(\frac{e}{3,7D} + \frac{2,51.S_1}{Re}\right)$ e $S_3 = -2log_{10}\left(\frac{e}{3,7D} + \frac{2,51.S_2}{Re}\right)$	-0,1385	$7,5x10^{-2}$	1×10^8
Zigrang e Sylvester (1982)	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.log_{10}\left(\frac{e}{3,7.D} - \frac{5,02}{Re}.\ log_{10}\left(\frac{e}{3,7.D} - \frac{5,02}{Re}.log_{10}\left(\frac{e}{3,7.D} + \frac{13}{Re}\right)\right)\right)$	-0,1385	$7,5x10^{-2}$	1×10^8
Vatankhah e Kouchakzadeh (2008, 2009)	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0,8686.ln\left(\frac{0,4587.Re}{(G-0,31)^{(G/(G+0,9633))}}\right)$ em que $G = 0,124.Re.\frac{e}{D} + \ln(0,4587.Re)$	-0,1472	$7,5x10^{-2}$	1×10^8
Serghides 2 (1984)	$f = \left(4,781 - \frac{(S_1 - 4,781)^2}{S_2 - (2.S_1) + 4,781}\right)^{-2}$ na qual $S_1 = -2log_{10}\left(\frac{e}{3,7D} + \frac{12}{Re}\right)$ e $S_2 = -2log_{10}\left(\frac{e}{3,7D} + \frac{2,51.S_1}{Re}\right)$	-0,3544	$1,0x10^{-6}$	2×10^6
Papaevangelou *et al*. (2010)	$f = \frac{0,2479 - 0,0000947.(7 - log_{10}.Re)^4}{\left(log_{10}.\left(\frac{e}{3,615.D} + \frac{7,366}{Re^{0,142}}\right)\right)^2}$	1,0074	$7,5x10^{-2}$	3×10^5
Avzi e Karagoz (2009)	$f = \frac{6,4}{\left((ln(Re) - ln\left(1 + 0,01.Re.\frac{e}{D}\left(1 + 10\sqrt{\frac{e}{D}}\right)\right)\right)^{2,4}}$	-4,7857	$7,5x10^{-2}$	1×10^8
Eck (1973)	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.log_{10}\left(\frac{e}{3,715.D} + \frac{15}{Re}\right)$	+8,20	$1,0x10^{-6}$	5×10^6
Round (1980)	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,8.log_{10}\left(\frac{Re}{0,135.Re.\left(\frac{e}{D}\right) + 6,5}\right)$	+10,92	$7,5x10^{-2}$	1×10^8

4 METODOLOGIA

No intuito de mapear procedimentos padrão ou já consagrados que permitissem avaliar e identificar os principais fatores que podem intervir na capacidade de geração de usinas hidrelétricas situadas em pequenas bacias hidrográficas, caracterizadas pela diversidade de usos dos recursos associados direta ou indiretamente à disponibilidade de água superficial, a bibliografia técnica relacionada ao tema de energia foi extensamente pesquisada.

Diante da carência de estudos associados a este tema ou da dificuldade de se obter informações detalhadas sobre os diferentes usos em quaisquer bacias hidrográficas, foi proposta uma metodologia de análise baseada **na abordagem sistêmica**, que levasse em conta desde a concepção do problema e a etapa de estudos ambientais que devem ser desenvolvidos para tentar diagnosticá-lo, até a realização de simulações matemáticas para se atingir ao objetivo proposto.

Considerando a essência do enfoque sistêmico, ou seja, o fato de que sistemas complexos se apresentam como elementos que interagem entre si e influenciam uns aos outros, agregados em todos ou conjuntos complexos, foi elaborado o diagrama de fluxo causal simplificado para o problema em questão, ilustrado na Figura 4.1.

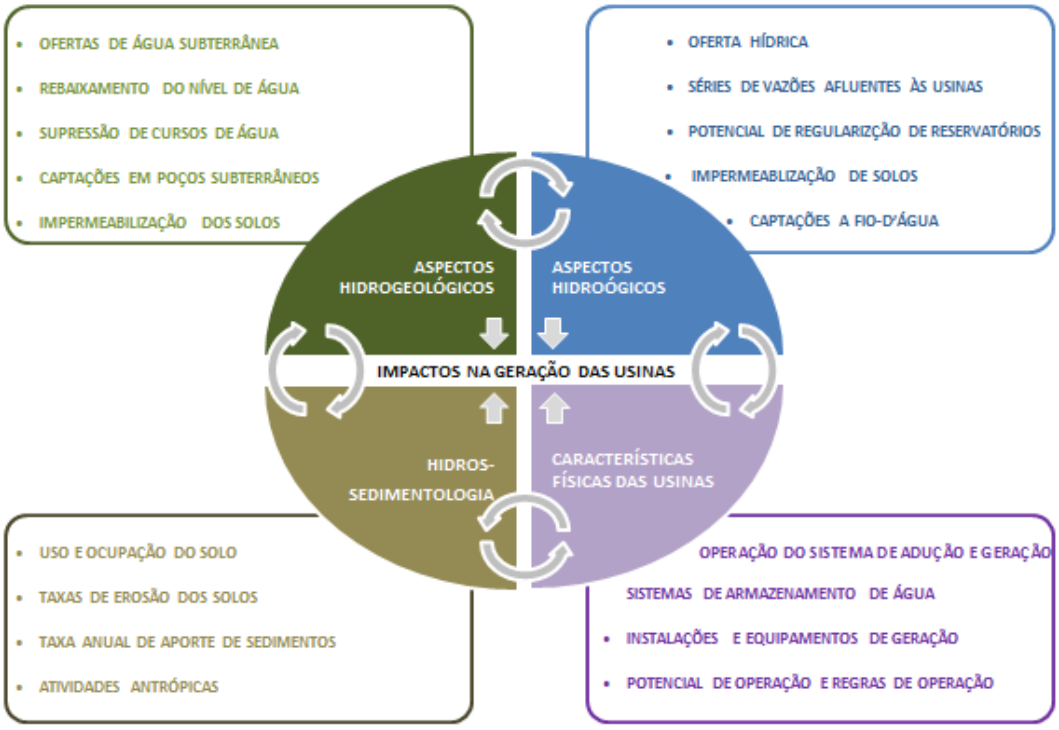


Figura 4.1 – Diagrama de enlace casual simplificado aplicado ao estudo de avaliação de impactos na capacidade de geração de energia em usinas hidrelétricas.

Pela análise desse diagrama é possível verificar inter-relação entre vários fatores e/ou variáveis, agrupados em sub-sistemas e/ou áreas comuns, quais sejam: hidrogeologia, hidrologia, hidrossedimentologia e características físicas da usinas. Ou seja, os aspectos geológicos influenciam e são influenciados pelos aspectos hidrológicos e vice-versa. Da mesma forma, diversos aspectos associados à disciplina da hidrossedimentologia são influenciados pelos aspectos hidrogeológicos, hidrológicos e pelas características físicas e operacionais das usinas. Por sua vez, todos influenciam, direta ou indiretamente, na capacidade geração das usinas.

Nesse contexto, as etapas de aplicação da abordagem sistêmica propostas por SENGE *et al.* (1997, *apud* RIBEIRO, 2006), ilustradas em forma de fluxograma por BORGES (2000) e apresentadas anteriormente na Figura 3.5 (Capítulo 3) foram adaptadas para o problema em questão. Como resultado dessa adaptação foram propostas as etapas de estudo indicadas na Figura 4.2, cuja aplicação deve ser antecedida da delimitação física do problema, associada aos limites de uma bacia hidrográfica qualquer.

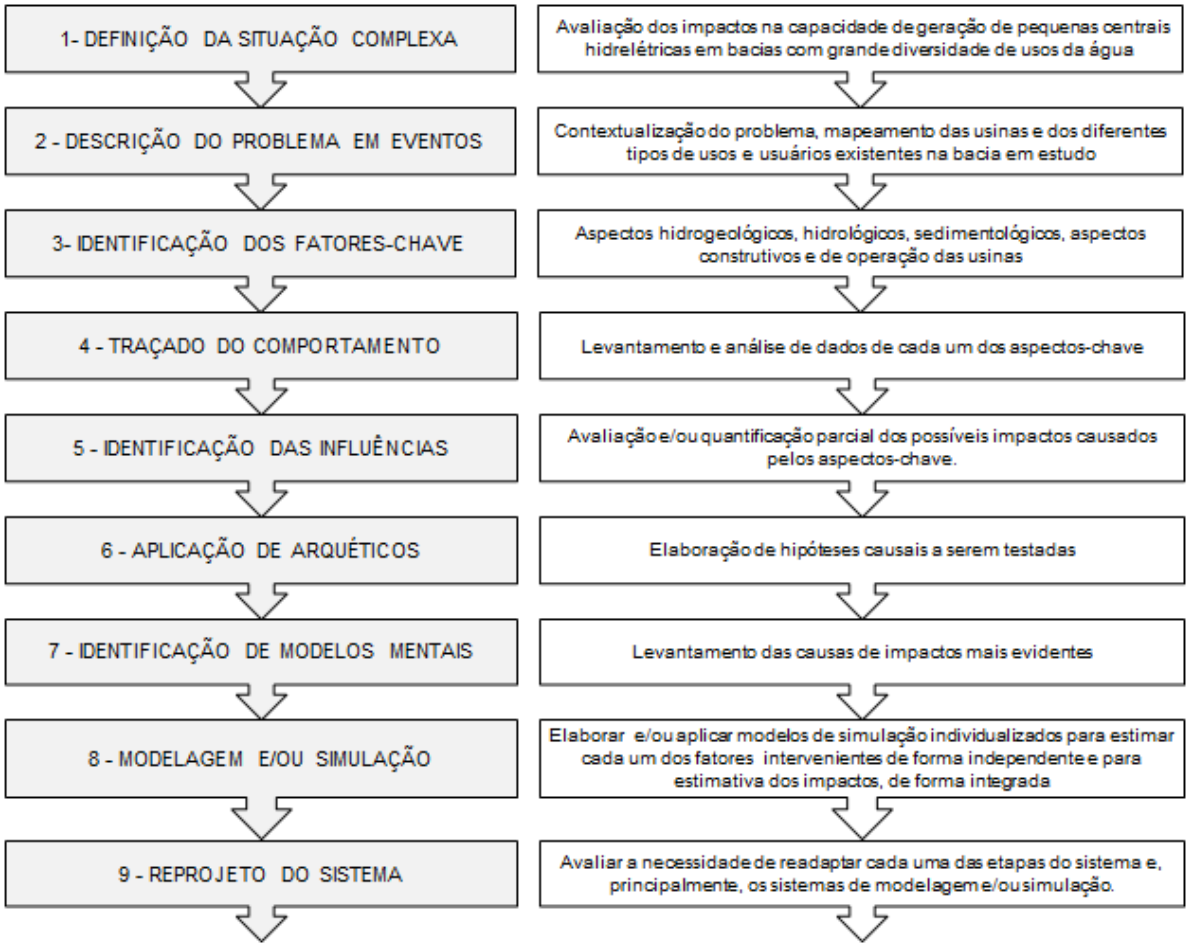


Figura 4.2 – Proposição das etapas para desenvolvimento e aplicação da abordagem sistêmica na avaliação de impactos na capacidade de geração de energia de usinas hidrelétricas.

Dando enfoque aos principais temas que se inter-relacionam com a disponibilidade de recursos hídricos, quais sejam: hidrogeologia, hidrologia, sedimentologia e hidroenergia, propõe-se a realização de estudos de diagnóstico, aplicados em quaisquer bacias hidrográficas, visando o mapeamento das possíveis fontes de impacto no sistema de geração de usinas eventualmente existentes em seus limites. Estes estudos, representados esquematicamente na Figura 4.3, são descritos de forma abrangente na sequência. Ressalta-se que, dependendo da peculiaridade da bacia hidrográfica em análise, alguns estudos específicos, não aqui referenciados, podem se fazer necessários.

Os **estudos de diagnóstico hidrogeológico** devem ser elaborados com enfoque principal na análise do rebaixamento de nível de água realizado na área dos empreendimentos de mineração eventualmente existentes nos limites da bacia, bem como na avaliação do impacto das captações de água subterrânea e na interpretação qualitativa da impermeabilização de solos, a qual induz redução das taxas de infiltração, podendo alterar as taxas de recarga dos

aquíferos e o escoamento de base dos cursos de água.

Os **estudos de diagnóstico hidrológico** devem ser elaborados com o intuito de restituir as séries de vazões médias mensais afluentes a cada uma das seções fluviais de interesse (barramentos e tomadas de água das usinas), bem como calcular os indicadores de oferta hídrica correspondentes. Esses estudos também permitem: determinar as disponibilidades hídricas superficiais nas seções de interesse; avaliar o potencial de regularização real dos eventuais reservatórios de barragens existentes na bacia; e simular o efeito da impermeabilização dos terrenos da bacia nos hidrogramas resultantes de eventos pluviométricos específicos, bem como verificar seu possível impacto na geração de energia.

Os **estudos sedimentológicos** devem ser desenvolvidos para caracterizar a bacia hidrográfica quanto ao seu potencial de produção natural de sedimentos, diretamente associado à erodibilidade dos solos ocorrentes na região. Tal potencial deve ser analisado ao longo dos anos e seus resultados cruzados com os registros de assoreamento ou batimetria dos reservatórios de regularização que abastecem as usinas, acaso existentes. De forma qualitativa, também deve ser avaliado o possível impacto na produção de sedimentos ocasionado por eventuais alterações antrópicas cujas intervenções promovem erosão e o transporte de sedimentos para os cursos de água.

Os **estudos hidroenergéticos** devem ser realizados com intuito de avaliar a qualidade e eficiência do sistema de usinas em operação, investigando: as condições e operação dos reservatórios de regularização, acaso existentes; os canais e condutos forçados que conduzem a água até as usinas; as instalações e equipamentos das casas de força; a forma de operação de cada usina e sua interligação ao sistema; e, o potencial de geração de cada usina.

A Figura 4.3 apresenta um fluxograma que sistematiza os estudos que devem ser realizados e os itens 4.1 a 4.4 apresentam a descrição resumida e sistematizada dos passos metodológicos referentes a cada uma das diferentes áreas a serem diagnosticadas para alcance dos objetivos propostos.

Figura 4.3 – Agrupamento de áreas e estudos que devem ser realizados visando a identificação de fatores que podem impactar a geração de energia de usinas hidrelétricas.

Após o levantamento dos possíveis fatores e/ou impactos mapeados em cada uma das grandes áreas comuns que interagem entre si e que possivelmente produzem interferências na capacidade de geração de usinas hidrelétricas, devem ser elaborados, aplicados e/ou adaptados modelos de simulação existentes, para quantificar cada um desses fatores. Esses modelos podem seguir o roteiro de aplicação proposto por Law e Kelton (1991, *apud* BORGES, 2000), cujas etapas foram ilustradas no fluxograma apresentado na Figura 3.6 (Capítulo 3).

Em cada uma das grandes áreas citadas (hidrogeologia, hidrologia, sedimentologia e hidroenergia) existe uma gama variada de modelos matemáticos com aplicação específica e que podem ser utilizados na quantificação individualizada de eventuais fatores intervenientes no processo de geração de usinas. A escolha desses modelos deve ser adequada aos objetivos do estudo e ser coerente com as características específicas do sistema em análise.

Posteriormente deve ser elaborado, adaptado ou aplicado pelo analista, um modelo para avaliação e quantificação desses fatores intervenientes na capacidade de geração das usinas em estudo. Esse modelo deve ser concebido a partir das características físicas do sistema e incorporar todas as variáveis e/ou fatores intervenientes de forma a permitir sua análise individualizada e integrada.

A Figura 4.4 ilustra um diagrama unifilar simplificado, representativo de um sistema a ser modelado de forma integrada, incluindo como dados de entrada as possíveis variáveis e/ou fatores intervenientes no processo de geração de usinas.

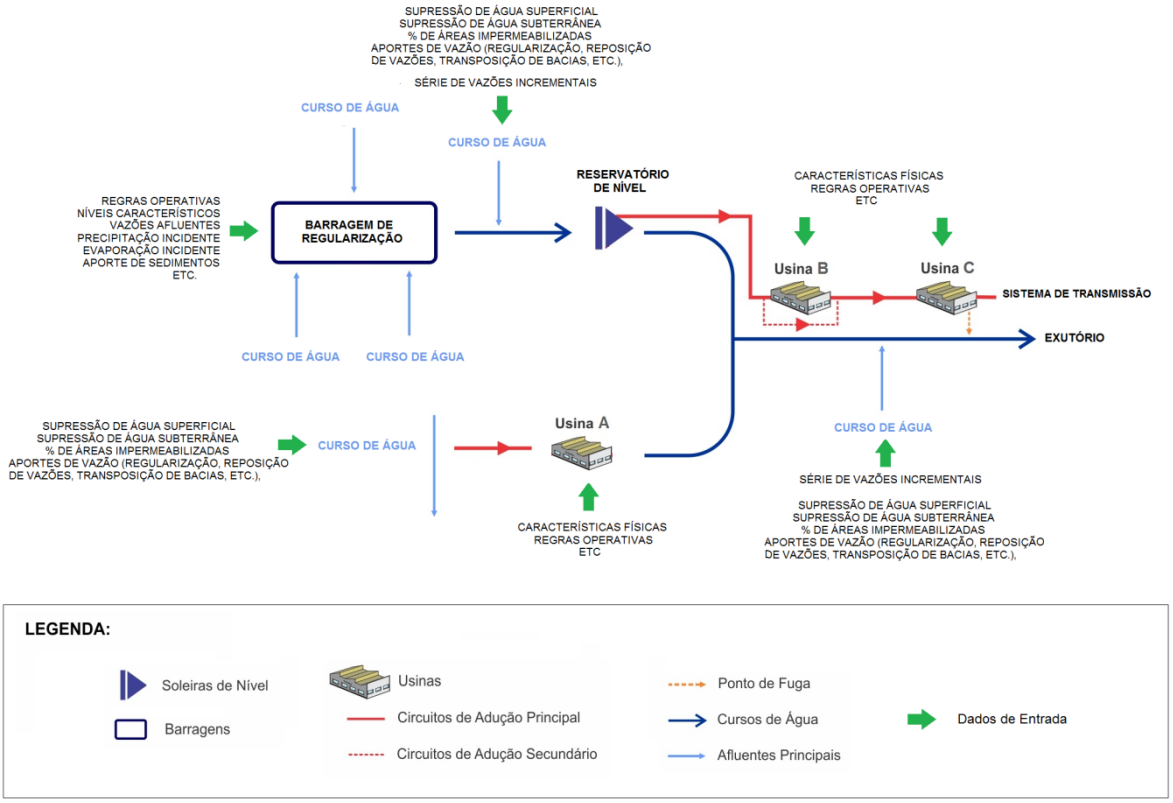


Figura 4.4 – Representação esquemática simplificada de um modelo para simulação e avaliação de impactos na capacidade de geração de usinas hidrelétricas.

4.1 ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS

Para avaliar os **aspectos hidrogeológicos**, propõe-se a realização das seguintes tarefas:

- Identificar os diferentes aquíferos e aquicludes que caracterizam as unidades hidrogeológicas e a associação destas com o seu respectivo sistema hidrogeológico, considerando o caráter litológico predominante, o comportamento hidrodinâmico e os tipos de permeabilidade (primária e secundária) presentes nos solos da bacia.
- Compartimentar a área de abrangência dos estudos, considerada como sendo a bacia hidrográfica, em domínios com características distintas em relação às possíveis interações entre águas subterrâneas e superficiais.

- Identificar diferentes tipos de uso e fatores antrópicos que podem alterar a relação entre as águas subterrâneas e os sistemas superficiais, quais sejam: poços de rebaixamento em regiões, pilhas de estéril e barragens de rejeitos ou de captação de água em domínios de mineração; nucleamentos urbanos (condomínios, loteamentos, vilas, clubes) e poços para abastecimento público e/ou consumo humano; presença de grandes áreas impermeabilizadas ou de reservatórios artificiais com destinação diversa, entre outros.
- Caracterizar cada um dos domínios definidos, incluindo a descrição de sua abrangência e a determinação de parâmetros físicos correspondentes (área de contribuição, por exemplo), a identificação dos sistemas hidrogeológicos presentes em seus limites, a avaliação da distribuição percentual das unidades hidrogeológicas aflorantes e da interação entre as águas superficiais e subterrâneas.
- Caracterizar a dinâmica de circulação das águas subterrâneas, por meio de modelos hidrogeológicos conceituais, avaliando a relação com as águas superficiais, no que tange à manutenção do fluxo de base local e a disponibilidade hídrica para os diferentes usuários da bacia.
- Avaliar o impacto do desaguamento dos aquíferos no fluxo de base, o qual pode ser calculado a partir da capacidade de regularização de águas subterrâneas das unidades hidrogeológicas presentes na área, expressa em termos de suas respectivas vazões de contribuição específica. Este conceito traduz o potencial de renovação e contribuição de águas subterrâneas de uma determinada unidade hidrogeológica, em função da área de exposição e da porosidade efetiva dos materiais geológicos, para a recomposição sazonal das recargas (reserva renovável) e das descargas (fluxo de base) aquíferas. Essa avaliação deve ser realizada com base em registros de monitoramento mensal de vertedouros/estações fluviométricas existentes na área de estudo ou região entorno.

4.2 ESTUDOS HIDROLÓGICOS

Para avaliação dos **aspectos hidrológicos** devem ser realizados estudos que incorporem:

- Inventário e análise da rede de monitoramento climatológico, pluviométrico e fluviométrico disponível nos limites da área de abrangência ou bacia hidrográfica.

- Definição de seções de referência para cálculo dos indicadores de oferta hídrica superficial e consideração dos mesmos domínios hidrogeológicos como sub-bacias para cálculo das disponibilidades hídricas superficiais.
- Determinação dos indicadores de oferta hídrica em seções de referência previamente definidas. Geralmente, em bacias de pequeno porte, não se dispõem de registros fluviométricos com período de registros suficientes para análise nas seções fluviais de interesse. Neste caso, devem ser aplicadas técnicas coerentes de regionalização de dados hidrológicos tais como: relação entre áreas de drenagem; relação entre a vazão de longo termo da estação e da seção de interesse, sendo esta última calculada por meio de balanço hídrico de longo termo na bacia; utilização da curva de permanência de vazões médias mensais, entre outros (TUCCI, 2002 e PINHEIRO, 2011). O método selecionado deve considerar aspectos geológicos, pedológicos, geomorfológicos, topográficos, climatológicos e pluviométricos das bacias hidrográficas com e sem dados, ou seja, ser aplicado em regiões consideradas hidrogeologicamente homogêneas.
- Utilização dos dados climatológicos, principalmente os pluviométricos, que têm relação direta com os registros fluviométricos, para caracterizar o clima e o regime de chuvas da área de interesse, e suportar os estudos de regionalização. Para tanto, devem ser analisadas relações entre os registros pluviométricos e as séries de vazões médias mensais monitoradas e/ou regionalizadas para a seção de interesse, de forma a validar o método de regionalização hidrológica empregado. Tais dados também podem ser utilizados na modelagem chuva-vazão, servindo como método para regionalização de indicadores de oferta hídrica, na ausência de registros fluviométricos ou para verificar possíveis impactos da alteração quantitativa do uso e ocupação do solo nas ofertas e disponibilidades hídricas da bacia.
- Estimativa das demandas hídricas superficiais e fontes de suprimento, tomando por base o cadastro oficial de usuários de água outorgados na bacia. No caso do estado de Minas Gerais estes dados são disponibilizados pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM).
- Avaliação das disponibilidades hídricas nas seções de referência, ou seja, confronto entre as ofertas hídricas superficiais e as demandas requeridas em cada sub-bacia.
- Avaliação do potencial de regularização de reservatórios existentes nos limites da bacia, ou seja, da capacidade destas de promover a regularização de um fluxo de vazão no

trecho de jusante ou de garantir volume e correspondente valor de vazão a ser captado (usuários consuntivos) ou utilizado (usinas) de forma contínua ao longo de todo o ano.

4.3 ESTUDOS SEDIMENTOLÓGICOS

Para avaliar a produção de sedimentos e o impacto do assoreamento dos reservatórios de barragens que promovem a regularização de vazões e contribuem para a geração de energia das usinas, devem ser realizados **estudos sedimentológicos** que englobem:

- Caracterização hidrossedimentológica da área de abrangência, ou seja, análise de todas as fontes potencialmente geradoras de sedimentos e estimativa das taxas de aporte de sedimentos correspondentes utilizando métodos consagrados, tais como a RUSLE; e,
- Determinação direta da taxa de assoreamento dos reservatórios, por meio da análise dos dados de batimetria, e confronto temporal com os fatores e respectivas taxas de aporte de sedimentos provenientes da bacia de contribuição, para avaliar as possíveis causas e aceleradores desse processo.

A caracterização hidrossedimentológica pode ser realizada por meio da aplicação de dois diferentes métodos, a depender da disponibilidade dos dados requisitados:

- Regionalização das curvas-chaves de descarga sólida total x vazão afluente, estabelecida a partir dos registros sedimentométricos de estações de monitoramento disponíveis. A rede de monitoramento de órgãos públicos geralmente dispõe de estações desse tipo apenas para cursos de água de grande porte, e restringem-se apenas à descarga sólida em suspensão. Desse modo, a curva-chave de descarga sólida total deve ser estimada a partir do método empírico de Colby ou de Einstein (CARVALHO, 2008) e posteriormente regionalizada para a área de interesse, tomando como base a série de vazões médias mensais correspondentes. Para validar as curvas-chaves estabelecidas pelo método de regionalização, podem ser realizadas medições de descarga sólida em campo, especificamente nas seções fluviais de interesse.
- Identificação e análise dos fatores responsáveis pelo processo de erosão dos terrenos, quais sejam: contexto litológico, solos, clima, precipitação, regime fluvial e atividades de uso e ocupação do solo. Nesse caso, pode ser aplicada a equação universal da perda de solo – RUSLE (BERONI e LOMBARDI NETO, 1985), integrando várias técnicas como: análise de cartografia multitemporal em plataforma de SIG – sistema de

informação geográfica; interpretação de aerofotografias pancromáticas e de imagens de satélite; e resgate de experiências de literatura técnica das áreas de agronomia e geomorfologia.

A estimativa das taxas de assoreamento dos reservatórios, por meio dos dados de batimetria, consiste na análise da diferença entre os volumes de água disponíveis em cada período e/ou levantamento específico, incluindo o volume primitivo ou inicial, todos referenciados a uma mesma elevação (normalmente, o nível de água normal de operação da estrutura). Essas diferenças correspondem às taxas de aporte de material/sedimentos, podendo ser expressas por período de tempo ou por ano. Tomando por um valor de densidade média dos grãos, representativo do material depositado, os volumes depositados podem ser convertidos em valores de descarga sólida total afluente, representado em toneladas.

Para completar a análise, valendo-se de um valor de eficiência de retenção do material no reservatório, calculado conforme métodos de Churchill e/ou Brune citados em ANEEL (2000) e Carvalho (2008), pode ser estimado o volume total anual afluente ao reservatório, o qual pode ser comparado com as taxas de aporte calculadas pelos métodos de caracterização hidrossedimentólogica da bacia, citados anteriormente, mediante a disponibilidade de dados.

Além dos métodos citados, também devem ser avaliadas, de forma qualitativa e temporal, todas as prováveis influências no comportamento hidrossedimentológico da bacia provocadas por intervenções antrópicas, como por exemplo: construção de rodovias, ferrovias e abertura de estradas vicinais; implantação de infraestrutura urbana; expansão das áreas de extração mineral; implantação de barragens e lagoas artificiais, entre outros.

Essa avaliação deve ser realizada por meio de mapeamento, seja por pesquisa ou análise de imagens de satélite: do período de início das obras de implantação; da estimativa de duração dessas obras ou da operação dos empreendimentos; da delimitação da área de influência, direta ou indiretamente impactada; da estimativa quantitativa da erosão do solo e/ou da produção de sedimentos da área de intervenção; da verificação da existência ou não de dispositivos de controle de material erodido; entre outros aspectos.

4.4 ESTUDOS ENERGÉTICOS

Para verificar a ordem de grandeza de eventuais impactos no potencial ou na capacidade de geração de usinas hidrelétricas identificadas no limite da área de estudo devem ser realizados **estudos hidroenergéticos**, incluindo basicamente as seguintes atividades:

- Identificação, caracterização e análise dos dados básicos do sistema de usinas existentes nos limites da bacia hidrográfica, bem como do histórico de geração correspondente.
- Descrição e análise do sistema de geração de cada usina, determinando a respectiva capacidade de geração e as perdas de carga correspondentes. Tais estudos devem ser realizados no intuito de identificar outros motivos/fatores associados a uma possível perda na capacidade de geração do sistema de usinas, não associados com as demais atividades antrópicas identificadas na bacia.
- Restituição das séries de vazões afluentes ao eixo de cada usina a partir do histórico de geração correspondente e comparação com as séries regionalizadas por meio dos estudos hidrológicos. Tais estudos devem ser realizados com o objetivo de identificar se, de fato, as perdas de geração, eventualmente identificadas, são decorrentes da incapacidade ou ineficiência do sistema de geração das usinas.

Para permitir a avaliação dos impactos dos possíveis fatores listados ao longo deste documento na capacidade de geração das usinas, deve ser utilizado e/ou desenvolvido um modelo prático para realizar simulações hidroenergéticas, incluindo diversos cenários de análise. Para iniciar os estudos, recomenda-se, basicamente:

- Cenário que corresponda à configuração atual do sistema de usinas, desconsiderando, porém, todos os usos consuntivos na bacia e assumindo a hipótese de que os principais reservatórios de regularização, acaso existentes, se encontram totalmente assoreados. Este cenário representa o potencial de geração do sistema sem a regularização proporcionada pelos reservatórios.
- Cenário que corresponda à composição atual do sistema de usinas, desconsiderando, porém, todos os usos consuntivos na bacia e a condição inicial de volume de seus eventuais reservatórios de regulação. Este cenário representa o potencial de geração do complexo de usinas, supondo apenas a presença deste tipo de uso na bacia.

- Cenário equivalente à composição atual do sistema de usinas e considerando todos os valores de vazão suprimidos pelos demais usos e usuários de água que utilizam ou consomem a vazão afluente ao sistema de usinas. Os resultados da simulação deste cenário também permitirão calibrar o modelo desenvolvido, ou seja, promover alterações nos parâmetros de entrada até se obter um bom ajuste entre os dados de geração simulados e os registros observados para um determinado período. Esse cenário também poderá ser subdividido em diversos outros cenários, os quais considerem cada uma das fontes de uso de forma independente (mineração, abastecimento público, entre outros), permitindo quantificar seus potenciais impactos isoladamente.
- Cenário que considere eventuais projetos de repotenciação das usinas, ou seja, substituição de máquinas hidráulicas, tubulações, sistemas de adução, entre outros, e, consequentemente, favoreçam ao aumento na capacidade de geração.

Como dados básicos para realização da modelagem supracitada devem ser considerados:

- Séries de vazões médias mensais afluentes a todas as seções fluviais de interesse, incluindo aquelas correspondentes aos pontos de tomada de água das usinas.
- Parâmetros básicos dos reservatórios de regularização: curvas cota x área x volume relativas a cada uma das batimetrias realizadas nos reservatórios, níveis característicos (nível de água normal de operação e mínimo operacional), área de contribuição, série de vazões médias mensais afluentes, volume médio mensal de precipitação e evaporação sobre a área do lago, restrições operativas e potencial médio mensal de regularização para os reservatórios de cabeceira.
- Parâmetros básicos das usinas: dados cadastrais (localização, ano de implantação e operação, tipo de turbina, número de unidades, entre outros), níveis característicos, queda bruta e líquida, potência instalada na ponta e fora de ponta, vazão máxima de engolimento, curvas de rendimento das máquinas, quadro de disponibilidade e séries de vazão média mensal afluente.
- Regras operativas (período de enchimento e regularização efetiva) e restritivas das barragens (níveis mínimos de deplecionamento) e usinas (direcionamento das vazões aduzidas e valores das vazões de engolimento): determinadas a partir da calibração do modelo, considerando a simulação do histórico de dados de geração disponíveis.

Para determinação da queda líquida torna-se necessário avaliar as perdas de carga no sistema de adução, contemplando o **efeito do envelhecimento nas tubulações** do sistema de adução e geração de usinas. Para tanto, propõe-se a estimativa da rugosidade superficial das tubulações, cuja alteração, segundo Porto (2000) pode estar diretamente associada com a perda de carga nos sistemas ou com a redução da capacidade de geração ao longo do tempo.

Para permitir o cálculo da rugosidade superficial (e), ao longo do tempo e para diversos diâmetros, pode ser empregada a equação de Darcy-Weisbach (LION, 1998; BROWN, 2002). Neste caso, torna-se necessária a disponibilidade do coeficiente de perda de carga ou de atrito (f) em função do tempo de uso. Igualando-se as equações de Hazen-Williams (Equação 3.10) e Darcy-Weisbach (Equação 3.12) obtém-se a Equação 4.1, por meio da qual é possível obter a correlação entre os coeficientes de perda de carga *C* e *f*, desde que consideradas as mesmas condições de vazão e diâmetro de tubulação.

$$f = 128{,}76\,(Q^{-0,15})\,(D^{0,13})/(C^{1,85}) \tag{4.1}$$

Com os valores do coeficiente f da equação de Darcy-Weisbach, do número de Reynolds (Equação 3.13) e utilizando-se o diagrama de Moody (Figura 3.9), é possível obter os valores de rugosidade relativa (e/D_{tub}). De posse desse valor e conhecendo-se o diâmetro do tubo, obtém-se o valor da rugosidade do mesmo.

Também podem ser utilizadas a equação de Colebrook-White (Equação 3.16) e a equação de Nikuradse (Equação 3.16), conforme realizado por Andrade e Carvalho (2001). Valendo-se dessa última equação obtém-se a Equação 4.2, que permite calcular o valor da rugosidade (e) do tubo em função do coeficiente f e do diâmetro efetivo da tubulação D_{eftivo} (Equação 4.3).

$$\frac{e}{D_{efetivo}} = \frac{10^{\left(1,74-\frac{1}{\sqrt{f}}\right)/2}}{2} \tag{4.2}$$

$$D_{efetivo} = D_{tub} - (2e) \tag{4.3}$$

nas quais $D_{efetivo}$ é o diâmetro efetivo da tubulação (mm).

Para se empregar a Equação 4.2, é necessário utilizar o valor do diâmetro efetivo da tubulação, o qual, por sua vez, depende do valor da rugosidade inicial (Equação 4.3). Para o

caso de tubos novos pode-se admitir valor de rugosidade inicial nula. Nos demais casos, à medida que o tubo vai envelhecendo, admite-se que a rugosidade é igual àquela correspondente ao período imediatamente anterior ao analisado. Nesse caso, pode-se adotar a recomendação de Brkić (2011), ou seja, de se utilizar no mínimo sete iterações para obter-se uma convergência menor ou igual a 0,01%.

Para se obter a influência do pH da água sobre a rugosidade superficial de uma tubulação com 30 anos de uso pode ser utilizado o ajuste aos dados apresentados em Azevedo Neto (1961), mostrado na Figura 3.8 (Capítulo 3) e representado pela Equação 4.4:

$$C_{30anos} = -16{,}86\ pH^2 + 271\ pH - 998{,}57 \qquad (4.4)$$

na qual, *C* representa o coeficiente de perda de carga de Hazen-Williams e *pH* o potencial hidrogeniônico da água.

De posse dos estudos de diagnóstico hidrogeológico, hidrológico, de uso e ocupação do solo, bem como da avaliação dos sistemas e correspondente capacidade potencial de geração das usinas, deve ser realizada uma **análise individualizada das variáveis correspondentes**, tomando por base as condições naturais da bacia, aquelas representativas da data de implantação das usinas hidrelétricas e as condições relacionadas ao cenário atual do sistema.

Além dessa análise em diferentes cenários, que permite verificar a influência quantitativa de cada um dos possíveis fatores intervenientes de forma temporal, também deve ser avaliada sua relação com as demais atividades presentes na bacia, ou seja, deve ser realizada uma **análise integrada dos principais fatores** e elementos condicionantes dessas variáveis, tanto espacial quanto temporalmente, bem como feita a identificação daqueles que, de fato, promovem e são responsáveis por algum tipo de impacto na geração das usinas.

Dentre esses fatores, aqueles que puderem ser quantificados devem ser incorporados nas simulações hidroenergéticas para avaliar a proporção de seus efeitos na capacidade de geração do sistema de usinas da bacia.

5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa foi elaborada com o intuito de apresentar um procedimento metodológico, fundamentado na abordagem sistêmica, para ser utilizado na avaliação dos principais fatores que interferem na redução da capacidade de geração de usinas hidrelétricas situadas em pequenas bacias hidrográficas e sujeitas a presença de grande diversidade de usos que podem alterara a disponibilidade da água superficial.

Tal metodologia consiste basicamente no mapeamento das diversas áreas e/ou elementos que se inter-relacionam e caracterizam o sistema local, correspondente à bacia hidrográfica na qual se inserem as usinas objeto de estudo. Para tanto, devem ser levantados dados básicos, bem como realizados estudos de diagnóstico hidrogeológico, hidrológico, sedimentológico e hidroenergético, os quais incluem fatores externos de um sistema complexo sobre a ótica da Teoria Geral de Sistemas e incluem grande parte das principais variáveis que podem afetar a dinâmica das águas superficiais, responsáveis pela alimentação do circuito de geração das usinas. Também devem ser levados em conta os fatores internos, tal como a perda de carga no sistema de geração, seja devido a alterações físicas do mesmo ou ao envelhecimento das tubulações constituintes, com o passar dos anos. Este fator é desconsiderado na maioria dos estudos desse tipo, os quais se valem de análises cartesianas e reducionistas.

Para aplicar a metodologia proposta foi selecionado um estudo caso, representado por um conjunto de sete pequenas centrais hidrelétricas instaladas em uma bacia de pequenas proporções e na qual existem diversos concorrentes pelo uso das águas superficiais ou que impactam no regime hidrológico do sistema de forma indireta.

Os resultados da aplicação da metodologia proposta permitiram verificar como os fatores mapeados interagem de forma complexa no sistema concebido e muitas vezes são de difícil determinação ou estimativa. Ou seja, cada uma das grandes áreas que influenciam direta ou indiretamente no processo de geração de usinas atua de forma integrada e muitas vezes é impossível mensurar seus efeitos de forma independente. Além disso, foi possível verificar que a aplicação de modelos mentais pré-estabelecidos, como a associação pura e simples de que alterações na disponibilidade hídrica superficial são as únicas fontes de impactos na geração de usinas, pode levar a conclusões equivocadas sobre a origem do problema e consequentemente afetar a tomada de decisões estratégicas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, M. Estimativa da perda de solo por erosão laminar na bacia do rio Bartolomeu-DF usando técnicas de geoprocessamento. 2000. (acessado em 02/07/213) In: http://www.dpi.inpe.br/cursos/ser300/Trabalhos/mariza.pdf.

ANA – Agência Nacional de Águas. Plano Estratégico de Recursos Hídricos da Região Tocantis-Araguaia - PERHTA, Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos, Brasília, 2008-2009. Relatório Síntese disponível em: www.ana.gov.br, 2017.

ANDRADE, Aurélio L. Pensamento Sistêmico: Um Roteiro Básico para Perceber as Estruturas da Realidade Organizacional. REAd - Revista Eletrônica de Administração (Disponível em: http://www.cesup.ufrgs.br/PPGA/read/read05/artigo/andrade.htm) PPGA/UFRGS, nº 4. 04/1997.

ANDRADE, J. J. O. Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão das armaduras: iniciação por cloretos. Tese de Doutorado Apresentada no Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, dezembro de 2000.

ANDRADE, L. e CARVALHO, J. A. Análise da equação de Swamee-Jain para cálculo do fator de atrito. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.5, n.3, p.554-557, 2001.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. BIG - Banco de Informações de Geração: Capacidade de Geração do Brasil: Disponível em http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm. Consultado em outubro de 2017.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Guia de Avaliação de Assoreamento em Reservatórios. Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas. 2000. 140 p.

AZEVEDO NETO, J. M. A. Manual de Hidráulica. Vol. I Editora Edgard Blucher, 3ª edição. São Paulo, 1961.

BABAJIMOPOULOS, C. e TERZIDIS, G. Accurate Explicit Equations for the Determination of Pipe Diameters. International Journal of Hydraulic Engineering, 2(5): 115-120, DOI: 10.5923/j.ijhe.20130205.05, 2013.

BEAR, J. Dynamics of fluids in porous media. New York. American Elsevier, 1972. 764 p.

BEATO, D.A.C., MONSORES, A.L.M., BERTACHINI, A.C. Hidrogeologia. In: Projeto APA Sul RMBH. Estudos do Meio Físico: área de proteção ambiental da região metropolitana de Belo Horizonte. Belo Horizonte: CPRM/SEMAD/CEMIG, 2005.v.9. Parte A.

BERTALANFFY, L. V. O significado da teoria geral dos sistemas. Teoria Geral dos Sistemas. Petrópolis (RJ): Vozes, 1973. p. 52-81. In.

BERTONI, J. e LOMBARDI NETO, F. Conservação do Solo. Piracicaba, SP: Editora Livroceres, 1985. 392p.

BORGES, M.A.V. Análise da Potencialidade de Sinergia entre o Pensamento Sistêmico e a Simulação Computacional. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Gradução em Engenharia de Produção (PPGEP) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção. Porto Alegre, 2000.

BRKIĆ, D. Review of explicit approximations to the Colebrook relation for flow friction, J. Pet. Sci. Eng. 34–48-77(1), 2011. Disponível em *http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2011.02.006*.

BROWN, G.O. The History of the Darcy-Weisbach Equation for Pipe Flow Resistance. Proceedings of the 150 th Anniversary Conference of ASCE. Washington DC, EUA, pp 34-43, 2002.

BUZZELI, D. Calculating friction in one step. Mach. Des. 80 (12), 54–55, 2008.

CARVALHO, N.O. Hidrossedimentologia Prática. 2ª Edição Revisada e Ampliada. Editora Interciência, 2008. 599p.

CIMADECILA, J.E. Patologia y Terapéutica del Hormigon Armado. Disponível em http://www.udc.es/dep/dtcon/estructuras/almacen/master0910/PATOLOGIA%20HORMIGON-01.pdf), pg. 63. Acessado em 25-02-2014.

ÇOBAN, M. T. Error analysis of non-iterative friction factor formulas relative to Colebrook-White equation for the calculation of pressure drop in pipes. Journal of Naval Science and Engineering, Vol.8, No.1, pp.1-13, 2012.

CODEMIG. Mapa Geológico Itabirito. Folha: SF.23-X-A-III-1. Escala 1: 50.000. Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero – Integração e Correção Cartográfica em SIG, 2005.

DeBERRY, D.W., KIDWELL, J.R., MALISH, D.A. Corrosion in a potable water systems. U. S Environmental Protection Agency. Washington D.C. 1982.

DOLAND, J. J. Hydro Power Engineering. The Ronald Press Company, New York, 1954.

DORR, J.V.N., GAIR, J. E, POMERENE, J.B. e REYNEARSON, G.A. Revisão da estratigrafia pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero. Rio de Janeiro, DNPM, 1957. p. 7-58. (DFPM, Avulso, 81). Trad. A. L. M. BARBOSA.

ELETROBRAS. Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas Diretoria de Engenharia, 2000.

ELETROBRÁS. Diretrizes para o Projeto Básico de Pequenas Centrais Hidrelétricas, 2007.

EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2ª edição. Rio de Janeiro, 2006.

FEITOSA, F.A.C. e MANUEL FILHO, J. Hidrogeologia Conceitos e Aplicações. 2ª Edição, CPRM, Serviço Geológico do Brasil, 2000.

FREITAS, M.J.C.C. e KAETSU, P. T. A gestão dos recursos hídricos e da estiagem no Oeste Catarinense: contribuição para uma análise sistêmica complexa. Dossier das Águas: Gestão do Patrimônio Hídrico. L & E, ISSN 2176-8846. Labor & Engenho, v. 9, n. 4, p. 34-50, out/dez, 2015.

FREITAS, S.P. Impacto do Consumo e Uso de Água na Mineração sobre o Bloco de Energia Assegurada em Empreendimentos Hidrogeradores: Estudo de Caso da PCH Bicas. Dissertação de Mestrado apresentada no Programa de Pós Graduação em Saneamento,

Meio Ambiente e Recursos Hídrico da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2012.

GARCÍA, M.H. Sedimentation Engineering, Processes, Measurements, Modeling and Practice. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice Nº 110, 2007, 1132 p.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Site oficial: http://www.ibge.gov.br, consultado em 2017.

IGAM, Instituto Brasileiro de Gestão das Águas. Site oficial: *http://www.igam.gov.br*, consultado em 2017.

JACON, K.J. e CUDO, G. Hidrologia: Curva-Chave, Análise e Traçado. MME, DNAE, SECT, CNPq, MRES, ORSTON. Brasília, 1989.

KASPER, H. O Processo de Pensamento Sistêmico: Um Estudo das Principais Abordagens a partir de um Quadro de Referência Proposto. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de PósGraduação em Engenharia de Produção (PPGEP) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção. Porto Alegre, 2000.

LIMA, A.A e MARTINEZ, C.B. Evolução da perda de carga em tubulações forçadas de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH). In: Congreso Latinoamericano XII de Hidrogeología y XXVI de Hidráulica - 25 al 30 de agosto de 2014.

LION, C.P. Limitations and proper use of the Hazen-Williams equation. Joumal of Hydraulic Engineering, Vol. 124. No.9, pg 951-954. September, 1998.

MOODY, L.F., Friction factors for pipe flow, Transactions of the ASME, vol. 66, pp. 671-684, Nov 1944.

MORRIS, G.L. e FAN, J. Reservoir Sedimentation Handbook, Design and Management of Dams, Reservoirs, and Watersheds for Sustainable Use. McGraw-Hill, 1997.

MOURÃO, M.A. A. 2007. Caracterização Hidrogeológica do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. 297 p.

NAGHETTINI. M.C. Notas de Aula, Engenharia de Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos. Belo Horizonte, 1999.

NIMER, E. Climatologia do Brasil, Superintendência de Recursos Naturais e Meio Ambiente, 2ª edição, IBGE, Rio de Janeiro, 1989.

PAIVA, E.M.C.D. e PAIVA, J.B.D. Caracterização Quali-Quantitativa da Produção de Sedimentos. Seleção de trabalhos apresentados no IV Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos (IV ENES) realizado em Santa Maria, RS, de 27 de novembro a 2 de dezembro de 2000. UFSM, ABRH, 2000. 435 p.

PAPAEVANGELOU, G., EVANGELIDES, C. e TZIMOPOULOS, C. A new explicit equation for the friction coefficient in the Darcy–Weisbach equation, Proceedings of the Tenth Conference on Protection and Restoration of the Environment: PRE10, July 6–9, 2010. Greece Corfu 166, 1–7, 2010.

PEREIRA, G.M. Projeto de Usinas Hidrelétricas – Passo a Passo. Oficina de Textos. São Paulo, 2015. 518 p.

PINHEIRO, M.C. Diretrizes para Elaboração de Estudos Hidrológicos e Dimensionamentos Hidráulicos em Obras de Mineração. ABRH, 1ª Edição, 2000. 308p.

PORTO, R. La.L. Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos. Porto Alegre, UFRGS e ABRH. Segunda Edição, 2002, 420 p.

PORTO, R.M. Hidráulica Básica. 4ª Edição revisada e ampliada. São Carlos, EESC-USP, 2006. 519 p.

PUC RIO, Divisão de Bibliotecas e Documentação. Capítulos 3. Material Disponível em *http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0124963_03_cap_03.pdf* Certificado Digital n0124963/CA. Consultado em 2017.

RAO, A.R e KUMAR, B. Friction Factor for Turbulent Pipe Flow Journal of Indian Water Works Association - eprints.iisc.ernet.in 9587, 2006.

REBOUÇAS, A.C. 1994. Sistema Aquífero Botucatu no Brasil. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 8, Recife, 1984. Anais. Recife, ABAS/DNPM/CPRM, 1984. P. 500-509.

RIBEIRO, H.R. Indicadores Sistêmicos. Compreendendo o Desempenho Organizacional com o Uso do Paradigma Sistêmico: Um Estudo Aplicado ao *Balanced Scorecard* de Empresa da Indústria do Refino de Petróleo. Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional do Programa de Pós-Graduação em Administração (PPGA) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Administração. Porto Alegre, 2006.

SAADI, A. Compartimentação geomorfológica do Quadrilátero Ferrífero. Relatório Técnico, incluindo mapeamento geomorfológico digital, 2008.

SCHREIBER, G. P. Usinas Hidrelétricas. Editora Edgard Blucher Ltda. e Engevix S.A. Estudos e Projetos de Engenharia. São Paulo, 1977. 236 p.

SERGHIDES, T.K. Estimate friction factor accurately. Chem. Eng. 91 (5), 63–64. 1984.

SOUZA, S.M. T. Disponibilidades hídricas subterrâneas no Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: HIDROSISTEMAS/COPASA, 1995. 525p.

SPAROVEK, R.B.M.; TORRADO, P.V; SPAROVEK, G. Erosão em sulcos, entresulcos e voçorocas em uma micro-bacia de Piracicaba (SP) intensamente cultivada. Sci. agric. vol.56 n.4 Piracicaba Oct./Dec. 1999. Disponível em *http://dx.doi.org/10.1590 /S0103-90161999000400013*.

TUCCI, C. E. M. Regionalização de Vazões, Editora da Universidade. UFRGS, 2002. 256 p.

U.S.D.A. United States of Department of Agriculture. Measuring Water in Irrigation Channels with Parshall Flumes and Small Weirs, Soil Conservation Service, Circular nº 04. Washington, 1950.

VATANKHAH, A.R. e KOUCHAKZADEH, S. Discussion of Turbulent flow friction factor calculation using a mathematically exact alternative to the Colebrook–White equation. by Jagadeesh R. Sonnad and Chetan T. Goudar. J. Hydraul. Eng. ASCE 134, (8), 1187, 2008.

VATANKHAH, A.R. e KOUCHAKZADEH, S. Discussion: Exact equations for pipeflow problems, by P.K. Swamee and P.N. Rathie. J. Hydraul. Res. IAHR 47 (7), 537–538, 2009.

VIEIRA, R. C; COTRIN, D. e KIRSCH, H. Análise Sistêmica: Uma ferramenta para Estudos Ambientais. ISSS Brasil. Disponível em *http://isssbrasil.usp.br/artigos/tcms_13.pdf*, 2017.

VIEIRA, V.F. Estimativa de perdas de solo por erosão hídrica em uma sub-bacia hidrográfica. Geografia – Universidade Estadual de Londrina, Departamento de Geociências - v. 17, n. 1, jan/jun 2008, p.73-81.

VON SPERLING, M. Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos. Volume 1, 3ª Edição. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

WIERNER, A. The role of water in development. New York. McGraw-Hill, 1972. 483 p.

WINTER, T.C., HARVEY, J.W., FRANKE, O.L. e ALLEY, W.M. Ground Water and Surface Water, A Single Resource. U.S. Geological Survey Circular 1139, Denver, Colorado, 1998.

WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses a guide to conservation planning. Washington: Agriculture Handbook, no. 537, U.S. Departament of Agriculture. 1978

ZIGRANG, D. J. e SYLVESTER, N. D. Explicit approximations to the solution of Colebrook friction factor equation. AICHE J. 28 (3), 514–515, 1982.