

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ENGENHARIA DE ENERGIA

DIMENSIONAMENTO DE MICROCENTRAL HIDROELÉTRICA
NO AMBIENTE DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

por

Glauber Ludwig

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro de Energia.

Porto Alegre, Dezembro de 2016

DIMENSIONAMENTO DE MICROCENTRAL HIDROELÉTRICA
NO AMBIENTE DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

por

Glauber Ludwig

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO DE ENERGIA
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne
Coordenador do Curso de Engenharia de Energia

Orientador: Prof. Dr. Eder Daniel Teixeira

Co-orientador: Prof. Alexandre Vagtinski de Paula

Banca examinadora:

Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques – IPH / UFRGS

Eng.º Rafael André Wiest – CEEE-GT

Prof. Dr. Flávio Antônio Becon Lemos – DELAE / UFRGS

Porto Alegre, 09 de Dezembro de 2016.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a realização desse trabalho aos meus pais e família, por todo apoio ao longo de minha graduação. Em especial aos meus avôs Carlos Nelson Ludwig e Redovino Foresti que, mesmo não estando entre nós, fornecem inspiração em minha vida.

Ao Professor Eder Daniel Teixeira, pela orientação na realização deste trabalho. Ao Professor Alexandre Vagtinski de Paula pela orientação da parte mecânica desenvolvida aqui, bem como ao Professor Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, pela parte elétrica. Ao Professor Flávio Antônio Becon Lemos, pela disciplina preparatória ao TCC de Projeto em Energia VIII.

A todos os colegas da Escola de Engenharia e de toda a UFRGS, pelo total apoio ao longo desses 5 anos de graduação. Aos amigos e colegas de trabalho, pelos momentos de diversão e ajuda nas diversas situações cotidianas.

LUDWIG, GLAUBER. **Dimensionamento de Microcentral Hidroelétrica no Ambiente de Geração Distribuída**. 2016. 29f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RESUMO

Este trabalho consiste na verificação da concepção de construção de uma microcentral hidroelétrica na cidade de Bento Gonçalves, com a possibilidade de inserção no Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE). Inicialmente, foram determinados os valores de vazão, queda e do arranjo do empreendimento. Após, foi realizado o dimensionamento, dividido em três áreas: civil, mecânica e elétrica. Na área civil, analisou-se o sistema de adução composto pela barragem, sistema de baixa pressão, chaminé de equilíbrio, conduto forçado e casa de máquinas. Na mecânica, foram levantados os parâmetros dos componentes de um Turbina Pelton, enquanto que na parte elétrica, dimensionou-se o gerador, com destaque para o uso de um motor de indução para a geração de energia. Por fim, foi realizada a análise da legislação brasileira e sua inserção no SCEE, bem como uma análise preliminar da quantidade de energia gerada anualmente. Como resultado, verificou-se a possibilidade de implantação de um aproveitamento hidroelétrico classificado como microgeração no ambiente nacional de Geração Distribuída (GD).

PALAVRAS-CHAVE: Microcentral hidroelétrica, geração distribuída, turbina Pelton, gerador de indução, Sistema de Compensação de Energia Elétrica.

LUDWIG, GLAUBER. **Micro hydro power plant scaling in a distributed generation scope**. 2016. 29f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ABSTRACT

This project consists verifying the conception of installing a micro hydro power plant in the city of Bento Gonçalves, with the possibility of insertion into the Electric Energy Compensation System (SCEE). Initially, the calculation of flow, fall and the arrangement of the project were performed. Afterwards, the sizing is carried out, divided into three areas: civil, mechanical and electrical. In the civil area, it was analyzed the adduction system, composed by dam, low pressure system, surge tank, penstock and powerhouse. In the mechanical area, the parameters of a Pelton Turbine are raised, while in electrical area, the generator is dimensioned, with emphasis on the usage of induction motor as generator. Finally, the analysis of the Brazilian legislation and its insertion in the SCEE is carried out, as well as a preliminary analysis of the amount of energy annually generated. As result, it was able to scale a hydro power plant classified as micro hydro in the Brazilian distributed generation scope.

KEYWORDS: Micro hydro power plant, distributed generation, Pelton turbine, induction generator, Electric Energy Compensation System.

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
A_a	– Área do conduto de adução.	m^2
A_c	– Área do conduto forçado.	m^2
A_{ch}	– Área da chaminé de equilíbrio.	m^2
$A_{ch\ min}$	– Área mínima da chaminé de equilíbrio.	m^2
A_d	– Área de drenagem.	km^2
α_{agulha}	– Ângulo da ponta da agulha	$^\circ$
α_{bocal}	– Ângulo do bocal na região da agulha	$^\circ$
β_1	– Ângulo de abertura do gume externo da pá da turbina.	$^\circ$
β_2	– Ângulo de abertura do gume central da pá da turbina.	$^\circ$
$B_{pá}$	– Largura da pá da turbina.	m
$b'_{pá}$	– Largura do rasgo da pá da turbina.	m
C	– Coeficiente de submergência.	-
d_a	– Diâmetro do conduto de adução.	m
d_{a1}	– Distância de dimensionamento agulha 1.	m
d_{a2}	– Distância de dimensionamento agulha 2.	m
d_{a3}	– Distância de dimensionamento agulha 3.	m
d_{a4}	– Distância de dimensionamento agulha 4.	m
d_c	– Diâmetro do conduto forçado.	m
d_{ch}	– Diâmetro da chaminé de equilíbrio.	m
d_e	– Diâmetro de entrada do sistema de agulha e bico injetor.	m
d_j	– Diâmetro do jato d'água pós bico injetor.	m
d_m	– Diâmetro de saída do bico injetor.	m
d_r	– Diâmetro da seção máxima junto à agulha.	m
d_{turb}	– Diâmetro da turbina.	m
e_a	– Espessura do conduto forçado para achatamento.	mm
e_c	– Espessura do conduto forçado.	mm
e_p	– Espessura do conduto forçado para pressão interna.	mm
F_{ch}	– Folga da Chaminé de Equilíbrio.	m
g	– Aceleração da Gravidade.	m/s^2
$H_{adução}$	– Perda de carga linear na tubulação de adução.	m
H_b	– Queda bruta.	m
$H_{conduto}$	– Perda de carga linear no conduto forçado.	m
$H_{d\ cond}$	– Perda de carga por mudança de direção do conduto forçado.	m
H_{fuga}	– Perda de altura de fuga da turbina.	m
H_{grades}	– Perda de carga nas grades para turbina Pelton.	m
H_{nichos}	– Perda de carga nos nichos.	m
$H_{p\ a}$	– Perda de carga na adução.	m
$H_{p\ total}$	– Perda de carga total.	m
$H_{s\ a}$	– Perda de carga por mudança de seção para adução.	m
$H_{s\ ch}$	– Perda de carga por mudança de seção para a chaminé.	m
$H_{s\ cond}$	– Perda de carga por mudança de seção para o conduto forçado.	m
H_{tomada}	– Perda de carga na tomada d'água	m
H_{turb}	– Perda de carga no bico injetor e agulha.	m
L_a	– Comprimento da adução.	m
L_c	– Comprimento do conduto forçado.	m
$L_{pá}$	– Comprimento da pá da turbina.	m
$m_{pá}$	– Excesso da pá da turbina.	m

\dot{m}	–	Variação temporal de água.	<i>kg/s</i>
n_{jatos}	–	Número de jatos.	<i>jatos</i>
n_{nom}	–	Velocidade de rotação nominal da máquina de indução.	<i>rpm</i>
$n_{pás}$	–	Número de pás.	<i>pás</i>
n_{qA}	–	Velocidade de rotação específica de Addison.	-
n_t	–	Velocidade de rotação da turbina.	<i>rpm</i>
η_{hidr}	–	Rendimento hidráulico da turbina.	%
$\eta_{g\ 50\%}$	–	Rendimento da máquina de indução com 50% de carga.	%
$\eta_{g\ 75\%}$	–	Rendimento da máquina de indução com 75% de carga.	%
$\eta_{g\ 100\%}$	–	Rendimento da máquina de indução com 100% de carga.	%
n_{sinc}	–	Velocidade síncrona de uma máquina.	<i>rpm</i>
Q_{disp}	–	Vazão disponível no curso d'água.	<i>m³/s</i>
Q_e	–	Vazão ecológica ou vazão sanitária.	<i>m³/s</i>
Q	–	Vazão de projeto.	<i>m³/s</i>
$Q_{est\ I}$	–	Vazão I estimada para estudo.	<i>m³/s</i>
$Q_{est\ II}$	–	Vazão II estimada para estudo.	<i>m³/s</i>
$Q_{est\ III}$	–	Vazão III estimada para estudo.	<i>m³/s</i>
P_{cv}	–	Potência no eixo da turbina.	<i>cv</i>
r_{turb}	–	Raio da turbina.	<i>m</i>
S_b	–	Submergência na barragem.	<i>m</i>
S_{ch}	–	Submergência na chaminé.	<i>m</i>
$T_{pá}$	–	Profundidade da pá da turbina.	<i>m</i>
v_a	–	Velocidade média no conduto de adução.	<i>m/s</i>
v_c	–	Velocidade média no conduto forçado.	<i>m/s</i>
$v_c\ máx$	–	Velocidade média no conduto forçado.	<i>m/s</i>
v_{jato}	–	Velocidade do jato d'água pós bico injetor.	<i>m/s</i>
$v_{r\ e}$	–	Velocidade relativa de entrada da água na pá.	<i>m/s</i>
$v_{r\ s}$	–	Velocidade relativa de saída da água na pá.	<i>m/s</i>
$v_t\ turb$	–	Velocidade tangencial da turbina.	<i>m/s</i>

SUMÁRIO

RESUMO	iv
ABSTRACT	iv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTO	1
1.2. MOTIVAÇÃO	1
1.3. OBJETIVOS	2
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
2.1. ENERGIA HIDROELÉTRICA	2
2.2. SISTEMA DE COMPENSAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	2
3. ESTUDOS BÁSICOS	5
3.1. ESCOLHA E DESCRIÇÃO DO LOCAL	5
3.2. DETERMINAÇÃO DA QUEDA BRUTA (H_b)	6
3.3. DETERMINAÇÃO DA VAZÃO DISPONÍVEL (Q_{disp})	7
3.4. VAZÃO ECOLÓGICA (Q_e) E VAZÃO DE PROJETO (Q)	8
3.5. ARRANJO PREVISTO	9
4. DIMENSIONAMENTO	10
4.1. OBRAS CIVIS	10
4.1.1. BARRAGEM	10
4.1.2. SISTEMA DE BAIXA PRESSÃO	11
4.1.3. CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO	11
4.1.4. CONDUTO FORÇADO	13
4.2. TURBINA	14
4.2.1. ESCOLHA DO TIPO DE TURBINA	15
4.2.2. DIMENSIONAMENTO	16
4.3. GERADOR	19
4.3.1. GERAÇÃO ASSÍNCRONA	19
4.3.2. DIMENSIONAMENTO DO CONJUNTO GERADOR	20
5. ANÁLISE DE PERDAS E POTÊNCIA FINAL	21
6. LEGISLAÇÃO DE GD EM MICROCENTRAIS HIDROELÉTRICAS	22
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	23
7.1. CONCLUSÃO	23
7.2. TRABALHOS FUTUROS	24
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24
APÊNDICES	26

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTO

A dependência de energia da sociedade atual faz com que se consolidem e se regulamentem novas formas de obtenção de energia, em especial para a sua conversão na forma de eletricidade. Historicamente, a conversão de energia se dá através da queima de matéria-prima, com o destaque atual para o carvão, petróleo e gás natural.

O avanço da oferta de energia no Brasil nas últimas décadas tem sofrido uma diversificação, pois, no ambiente da energia hidráulica, já houve o aproveitamento dos melhores pontos, seja pela visão ambiental quanto econômica. Para evitar que o país se encontre em uma estreita faixa na relação oferta vs. demanda, enfatiza-se o caráter econômico presente em aproveitamentos hidroelétricos de maior custo ou de outras fontes, renováveis ou não, que historicamente possuem preços mais elevados quanto à base hidráulica. Através de situações como essa que se faz possível a análise de fontes que ofereçam melhor relação econômica-ambiental, abrindo espaço, portanto, para os estudos de pequeno porte, de forma descentralizada e com reduzido impacto ambiental.

Com a política energética planejada ao longo das últimas décadas, foi possível a segmentação do setor elétrico brasileiro que, por muitos anos, era centralizada em grandes parques geradores, sistemas de transmissão e redes de distribuição que, por fim, entregavam ao consumidor final a energia, de forma unilateral. Foi através dessa segmentação que surge o que hoje é conhecido como Geração Distribuída - GD, na qual um ponto de conexão em uma distribuidora local não mais possui trânsito de energia de forma unilateral, mas sim de forma bilateral. Paralelo à consciência ambiental dos impactos causados pela geração de energia, o fator econômico têm, de forma bastante expressiva, contribuído para a propagação desses sistemas em todo o Brasil: em consulta à página da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, em Outubro/16, o número de Micro e Minigerações Distribuídas era 6.017, com expressiva participação de geração fotovoltaica, 98,53 % (ANEEL, 2016a).

Com a expressiva utilização de fonte hídrica para grandes potências, infere-se que todo o conhecimento na energia hidráulica que o século passado consolidou possa ser aproveitado em sistemas de baixa potência de forma distribuída e descentralizada, de forma a adequar-se à legislação vigente feita pela ANEEL, de âmbito nacional para todas as concessionárias. Com isso, o trabalho se direcionará no estudo de um local na Serra Gaúcha com características para aproveitamento hidroelétrico e seu respectivo dimensionamento para uso em um sistema de GD, conforme as Resoluções ANEEL nº 482/2012 e nº 687/2015.

1.2. MOTIVAÇÃO

Conforme dados do registro da ANEEL de Micro e Minigeração de Outubro/2016, somente há 5 instalações de fonte hidráulica sobre um total de 6.017 sistemas de Geração Distribuída em todo o país. Através do conhecimento adquirido na geração de fonte hídrica, essa responsável hoje por cerca de $\frac{3}{4}$ da energia produzida no Brasil, e da favorável geografia nacional que o estudo de dimensionamento e análise de Micro e Minicentrais Hidroelétricas voltadas ao conceito de Geração Distribuída motivaram a realização do presente trabalho.

Aliado a uma padronização imposta pela ANEEL para todas as distribuidoras de energia do país, a partir do ano de 2015 também houve incentivos fiscais por órgãos federais e estaduais para estimular a viabilidade econômica de projetos com características como do aproveitamento apresentado neste trabalho. A tarifa de energia constitui-se basicamente pelos preços da energia, da transmissão, da distribuição e da tributação, essa última composta pelas parcelas de ICMS, PIS e COFINS, sendo a primeira de âmbito estadual e as duas restantes na esfera federal. Conforme decisões governamentais de 2015, os tributos de PIS e COFINS são reduzidos à zero para a energia ativa produzida pela unidade no Sistema de Compensação de Energia Elétrica - SCEE, que será explicado ao longo do trabalho. Após isso, em Março/16 o

Governo do Rio Grande do Sul zera a partir de Junho/16, através da adesão de um convênio nacional de ICMS, a alíquota de ICMS para essa mesma energia que, na realidade de uma alíquota de até 30 %, perfazem um grande resultado no estudo econômico de implantação de um sistema, fomentando a sua pesquisa e desenvolvimento.

1.3. OBJETIVOS

O presente trabalho buscará apresentar um local para aproveitamento hidroelétrico de baixa potência localizado na Serra Gaúcha e sua inserção na Geração Distribuída (GD).

Após isso, serão feitos os dimensionamentos dos parâmetros civis, mecânicos e elétricos necessários para a sua construção, para finalmente analisar esse aproveitamento frente à realidade regulatória.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. ENERGIA HIDROELÉTRICA

A energia hidroelétrica é gerada, essencialmente, pelo aproveitamento da energia potencial de um curso d'água. A energia hidráulica fornecida à turbina equivale ao peso de água deslocado no trecho compreendido entre a seção de entrada e saída dos condutos forçados (Flórez, 2014). A energia potencial é primeiramente convertida em cinética pela turbina e, por fim, em energia elétrica através do gerador elétrico.

A magnitude da potência disponível para geração se dá pela multiplicação do desnível geométrico com a vazão mássica de água do fluxo. Assim, toda e qualquer usina necessita de queda e vazão, porém são inúmeros os arranjos possíveis para uma mesma faixa de potência. A Tabela 2.1 mostra aproveitamentos com potências semelhantes, porém com alturas de projeto com significativa diversidade.

Tabela 2.1 – Dados de quedas nominais de usinas com potências semelhantes

Nome	Potência	Queda	Fonte
UHE Foz do Chapecó	855 MW	49,80 m	(CBDB, 2016)
UHE Campos Novos	880 MW	180,00 m	(ENERCAN, 2016)
UHE Henry Borden	889 MW	720,00 m	(EMAE, 2016)

2.2. SISTEMA DE COMPENSAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

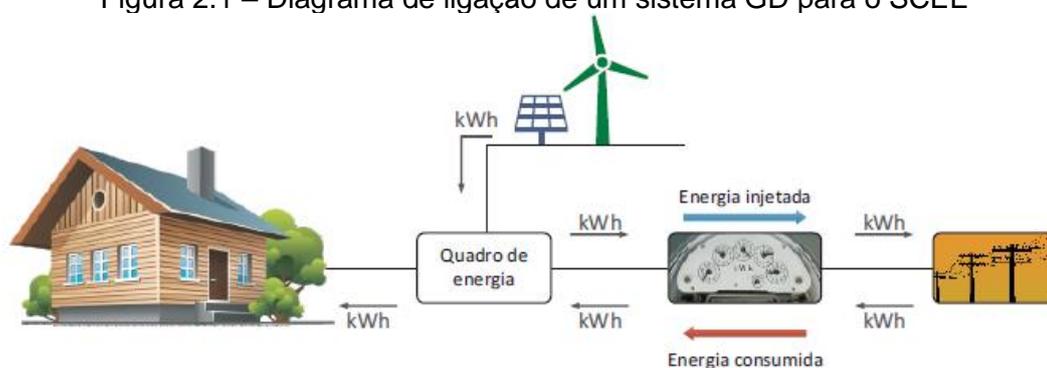
O Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) foi o método regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para possibilitar a existência da Geração Distribuída (GD). A GD consiste na ligação de pequenas unidades no sistema elétrico de geração de forma descentralizada, diferente de um sistema elétrico regular. Assim, pode-se definir que GD é o ambiente que possibilita uma unidade consumidora produzir energia elétrica para si e para o sistema de distribuição que ela está ligada, enquanto que o SCEE é a forma de contabilização imposta à unidade uma vez que ela se encontra conectada à rede da distribuidora.

Em 2010, a ANEEL publica a Resolução Normativa N° 414 de 09/09/2010, que estabelece as condições gerais de fornecimento entre o consumidor e distribuidora (ANEEL, 2010). Entretanto, essa Resolução não possui quaisquer regulamentações sobre sistemas de GD, que até então estavam somente em fase de testes, celebrados diretamente junto às distribuidoras de energia. Neste contexto, com o objetivo de regulamentação de um sistema que viesse tornar mais acessível aos consumidores de menor porte, a ANEEL publica, no primeiro semestre de 2012, a Resolução Normativa N° 482 de 17/04/2012, que regulamenta e padroniza os procedimentos para o acesso à rede de centrais de geração de pequeno porte, até então estabelecidos conforme critérios da própria distribuidora do local da unidade (ANEEL,

2012). Dessa forma, o processo para a inserção de geração se tornava homogêneo, garantindo uma melhor transparência na relação entre consumidores e distribuidoras. Por fim, em 24/11/2015, é publicada a Resolução Normativa N° 687, que realiza alterações no texto da Resolução N° 482 e nos Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST, que abordam todos os parâmetros técnicos da conexão da unidade ao sistema (ANEEL, 2015). Através dessa linha cronológica na regulamentação do ambiente de Geração Distribuída, é estabelecida a Legislação que será utilizada no estudo.

O SCEE compreende à contabilização da energia elétrica gerada como um empréstimo gratuito à distribuidora local, no qual esse montante de energia, dado em kWh, será posteriormente compensado como consumo de energia elétrica ativa. Com isso, pode-se fazer a analogia de que a rede de distribuição comporta-se, portanto, como um sistema de armazenamento, na qual o balanço se dará ao fim de um ciclo de faturamento (regularmente mensal), podendo essa energia possuir discretização horária dependendo da tarifação vigente na unidade. A Figura 2.1 mostra um sistema de GD na qual o SCEE é aplicado.

Figura 2.1 – Diagrama de ligação de um sistema GD para o SCEE



Fonte: (ANEEL, 2016b).

A Tabela 2.2 estabelece as potências para cada uma das classes de geração que compreendem o sistema de GD no Brasil. A potência de 75 kW definida para a microgeração é o valor limite para o fornecimento em Baixa Tensão – BT para as concessionárias do Rio Grande do Sul (CEEE, RGE e AES-Sul, 2012), conforme documento celebrado entre elas. Dessa forma, espera-se que o processo de ligação de uma Microgeração de energia no Rio Grande do Sul possa ser facilitado quando a potência da unidade a ser ligada seja de até 75 kW.

Tabela 2.2 – Limites de potências para micro e minigeração para GD

Classe	Limite	Fonte
Microgeração	Igual ou menor a 75 kW	Quaisquer
Minigeração	Maior que 75 kW e menor ou igual a 3 MW	Hídrica
	Maior que 75 kW e menor ou igual a 5 MW	Quaisquer

Fonte: (ANEEL, 2015).

A situação mais simples de um sistema de compensação é a contabilização na própria unidade, na qual a mesma instalação possui uma característica de consumidor e produtor, como o caso de instalações fotovoltaicas em instalações residenciais. Uma vez que esse tipo de configuração possa não ser comum em geração hidroelétrica, foi necessária a regulamentação de mais tipos característicos de consumo (ANEEL, 2012):

- Empreendimentos com Múltiplas Unidades: conjunto de consumidores independentes de energia que possuam instalação de uso comum. Um caso típico seria a micro ou minigeração em um condomínio, cuja energia primeiramente seria compensada na área comum e o restante fracionado dentre as outras unidades que o compõe.
- Geração Compartilhada: reunião de consumidores, restritos à mesma área de concessão (mesma distribuidora), feita por consórcio ou cooperativa, podendo ser

pessoa física ou jurídica. Nesse caso, exemplifica-se uma comunidade que crie uma unidade com geração, cuja energia seria compensada dentre os participantes.

- **Autoconsumo Remoto:** unidade consumidora de mesma titularidade, podendo ser pessoa física ou jurídica. De forma semelhante à compartilhada, aqui exemplifica-se uma pessoa que tenha um sítio com uma micro ou minigeração instalada, cuja energia seria compensada em sua residência fixa na cidade, desde que ambas estejam sob a mesma área de concessão.

Muitas vezes, os locais favoráveis para a implantação da geração na forma hídrica ficam em pontos de difícil conexão ao sistema elétrico, na qual podem ser necessárias melhorias ou reforços de rede para esse novo ponto de geração. Entretanto, a Legislação, além de estipular prazos máximos para a documentação da concessionária junto ao interessado, também estabelece em quais os casos haverá participação financeira por parte do consumidor/produtor. Para a microgeração (exceto para casos de Geração Compartilhada), diferente da minigeração, o interessado não possui qualquer custo envolvido acerca de melhoria de rede (manutenção da prestação do serviço), reforço de rede (aumento da capacidade de serviço) ou sistema de medição. De forma geral, a potência instalada máxima que a concessionária pode garantir para injeção na rede é a potência de cargas de consumo originalmente declarada na unidade junto à concessionária. Caso for desejado aumentar a potência para além desse valor, é necessária a solicitação à distribuidora, sem necessidade de que a carga de consumo da unidade tenha que ser aumentada (ANEEL, 2012).

Cabe salientar que a concessionária deve seguir às normas do Módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição - PRODIST, que estabelece os procedimentos de acesso à rede, bem como os equipamentos de proteção para garantir a segurança e qualidade da energia injetada na rede (ANEEL, 2016b). Os procedimentos, bem como os prazos envolvidos no processo, são mostrados na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Procedimentos e etapas de acesso



Fonte: (ANEEL, 2016b).

O faturamento, por sua vez, se dará da contabilização total da energia consumida (como é regularmente feito em uma unidade sem geração) e da contabilização total da energia injetada no sistema, podendo essa ter discretização horária diferente. O montante de energia faturado dependerá, portanto, dos valores registrados no montante da geração, respeitando os valores mínimos de faturamento conforme a sua classe: monofásico – 30 kWh, bifásico – 50 kWh e trifásico – 100 kWh (ANEEL, 2012). A Tabela 2.3 mostra um exemplo de faturamento de uma unidade trifásica em BT dentro do SCEE.

Tabela 2.3 – Exemplo de Consumo e Geração em uma unidade do SCEE

Mês	Consumo	Geração	Crédito	Faturado
Jan	330 kWh	353 kWh	23 kWh	100 kWh
Fev	360 kWh	360 kWh	23 kWh	100 kWh
Mar	460 kWh	335 kWh	00 kWh	102 kWh

Fonte: (ANEEL, 2016b).

Os tributos que incidem sobre a energia elétrica são o ICMS (Estadual), PIS e COFINS (Federal). Inicialmente, a energia produzida e então utilizada como crédito só tinha devolução no valor da Tarifa do Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) e Tarifa de Energia (TE), que são os valores recolhidos pela distribuidora para a manutenção da rede e fornecimento de energia. No Rio Grande do Sul, o ICMS de uma fatura de energia residencial ou comercial é de 30 %, enquanto que o PIS e COFINS dos 12 últimos meses para a RGE (distribuidora do local de análise) ficaram em 0,94 % e 4,32 %, respectivamente (RGE, 2016a). Entretanto, uma tributação total de 35,26 %, pela forma de cálculo regularizado pela ANEEL, reflete em uma alíquota final de 54,46 %, obtido nesse caso através da relação $1/(1 - 0,3526) = 1/0,6474 = 1,5446$, impactando bastante no cálculo de retorno financeiro que o interessado deve praticar (ANEEL, 2011). Dessa forma, uma vez que a energia é consumida, seria cobrado 54,46 % de imposto, independente se esse montante de energia fosse, por fim, compensado na unidade.

3. ESTUDOS BÁSICOS

3.1. ESCOLHA E DESCRIÇÃO DO LOCAL

A escolha do local do aproveitamento hidroelétrico apresentado neste trabalho se deu através de análise de mapas digitais (com a utilização da ferramenta *Google Earth®*) e de diversas visitas de campo na Serra Gaúcha.

O objetivo foi buscar um local que apresentasse queda natural e um curso d'água perene visando à implantação de um aproveitamento com características de micro ou minicentral hidroelétrica. O local encontrado se localiza no distrito de Tuiuty, no interior da cidade de Bento Gonçalves. O uso da ferramenta *Google Earth®* possibilitou as primeiras estimativas de potencial energético, baseadas nas coordenadas planialtimétricas presentes nos mapas, além de possibilitar uma visão tridimensional da área analisada. Sua exata localização é de 12 km do centro da cidade de Bento Gonçalves e de 3 km da BR-470, que liga as cidades de Bento Gonçalves e Veranópolis em direção ao Vale do Rio das Antas, sentido Sul-Norte. As coordenadas geográficas do local de barramento e da casa de máquinas do aproveitamento hidroelétrico vislumbrado se encontram na Tabela 3.1. Adicionalmente, a Figura 3.1 mostra estes locais em uma imagem do *Google Maps®*, juntamente com as indicações de localização da BR-470 e da cidade de Bento Gonçalves.

Tabela 3.1 – Coordenadas Geográficas do Aproveitamento

Local	Latitude	Longitude
Barragem	29° 6' 12,02" S	51° 31' 20,20" O
Casa de Máquinas	29° 5' 55,99" S	51° 30' 16,26" O

Fonte: (Google, 2016a).

Figura 3.1 – Localização do aproveitamento, com indicação do ponto da barragem



Fonte: (Google, 2016b).

3.2. DETERMINAÇÃO DA QUEDA BRUTA (H_b)

A região de estudo possui um relevo bastante acidentado, na qual o desnível geográfico será bastante importante para a potência prevista de geração do aproveitamento hidroelétrico. O ponto de escolha para a barragem, conforme pode ser visto na Figura 3.1, foi determinado por possuir acesso rodoviário fácil. Nas proximidades, há o cruzamento da estrada local com o curso d'água, onde o mesmo, abaixo do cruzamento é canalizado em dois bueiros circulares paralelos, cada um com 1,10 m de diâmetro e 5 segmentos de cerca de 1 m de comprimento, local esse que será utilizado para a medição de vazão.

Dessa forma, coletou-se o valor de altitude nas coordenadas com o *Google Earth®* do ponto escolhido para a implantação da barragem - cuja execução será discutida mais adiante – como sendo a cota do nível d'água de montante, já que se vislumbra uma altura pequena de barramento, entre 1 e 3 m que, se contados à imprecisão dos dados do *Google Earth®*, especificamente de altimetria, pouco irão influenciar no desnível total. Já para o ponto de jusante, representado na Figura 3.1 como “Casa de Máquinas”, também se priorizou um local de fácil acesso rodoviário em que, de forma semelhante ao ponto de montante, coletou-se o valor de altitude para o ponto, que estão descritos, junto com o desnível resultante, na Tabela 3.2.

O comportamento do desnível geográfico pode ser visto na Figura 3.2, que mostra o perfil de elevação do curso d'água, representado pela linha vermelha; também, há diversas informações quanto às inclinações e distâncias do percurso. Pode-se ver claramente que nos primeiros metros de percurso não há grande variação de altura, indicando um satisfatório local para a execução da barragem.

Tabela 3.2 – Altitudes dos pontos de montante e jusante

Local	Altitude
Barragem	499 m
Casa de Máquinas	219 m

Fonte: (Google, 2016a).

Figura 3.2 – Perfil de Elevação e Inclinações do curso d'água



Fonte: (Google, 2016a).

Assim, a queda bruta de água para o dimensionamento do aproveitamento, através da Equação 01, resulta em 280 m:

$$H_B = H_{montante} - H_{jusante} [m] \quad (01)$$

$$H_B = 499 - 219 = 280 \text{ m}$$

3.3. DETERMINAÇÃO DA VAZÃO DISPONÍVEL (Q_{disp})

Após a determinação da queda bruta do aproveitamento (H_B), é necessário determinar a vazão útil a ser turbinada, para que se torne possível a estimativa da potência instalada.

No ponto de cruzamento da estrada local com o curso d'água há, conforme descrito no item anterior, dois bueiros circulares, que foram utilizados para a medição de vazão. A disposição dos bueiros está mostrada na Figura 3.3. O processo consistiu na captação da água de cada bueiro em um recipiente e, com a medição do tempo de enchimento e do peso de água contido no recipiente, foi possível verificar a vazão mássica do sistema. Dessa forma, prosseguiu-se com a medida do tempo de enchimento dos dois bueiros, onde se dividiu a medida do bueiro direito, que possuía uma vazão claramente maior, em duas medidas igualmente espaçadas. Para cada evento, realizou-se 20 tomadas de tempo para o enchimento, onde em cada medida tomava-se a massa do recipiente que, descontada a massa de 400 g do recipiente, pode-se estimar uma vazão mássica, dada nas unidades de kg/s. Por fim, desconsiderou-se os valores que tivessem desvio padrão elevado. Os valores de todas as tomadas estão dispostos no Apêndice I, enquanto a Tabela 3.3 mostra os valores finais de cada seção, bem como, a vazão final do sistema, perfazendo a estimativa total de todo o curso d'água, na consideração de uma Massa Específica da água como 1.000 kg/m³.

Figura 3.3 – Disposição dos bueiros onde foram realizadas as medidas de vazão



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3.3 – Valores de Vazão obtidos na leitura por Enchimento de Recipiente

Local	Vazão [m ³ /s]
Bueiro 01	0,01248 m ³ /s
Bueiro 02 – Lado Esquerdo	0,01972 m ³ /s
Bueiro 02 – Lado Direito	0,02495 m ³ /s
Total	0,05715 m³/s

Dessa forma, foi determinado que a vazão disponível (Q_{disp}) para o curso d'água em estudo, obtida através de medida real pelo método de volume *versus* tempo (enchimento de recipiente) é, aproximadamente, 57,15 l/s:

$$Q_{disp} \cong 0,05715 \text{ m}^3/\text{s} \cong 57,15 \text{ l/s}$$

Para validar o valor de vazão disponível, foi estudado um outro método para estimar este parâmetro. Neste sentido, foi escolhida a regionalizações de vazões, apresentada no documento (ANEEL, 2001). De acordo com a referência citada, é possível estimar a vazão de referência (Q_{est}) de um curso d'água em função da área de drenagem (A_d) do aproveitamento. Para a Bacia Antas-Taquari, na qual o local em estudo está contido, há três formas (I, II e III) de cálculo para obtenção da vazão de referência ($Q_{est I}$, $Q_{est II}$, $Q_{est III}$), apresentadas pelas Equações 02, 03 e 04, respectivamente, onde A_d é a área de drenagem em km² e P_a a precipitação anual do Local, em metros.

$$Q_{est I} = 0,0231 * A_d \text{ [m}^3/\text{s]} \quad (02)$$

$$Q_{est II} = 0,0225 * A_d^{1,003} \text{ [m}^3/\text{s]} \quad (03)$$

$$Q_{est III} = 0,0086 * A_d^{1,004} * P_a^{1,783} \text{ [m}^3/\text{s]} \quad (04)$$

Para a determinação da área de drenagem, considerando como exutório da bacia hidrográfica o local da barragem, foram utilizadas as ferramentas *Google Maps*® e *Google Earth*®. As Figuras 3.4 e 3.5 mostram o mapa do perfil de elevação no *Google Maps*® e o polígono referente a essa área no *Google Earth*®, onde foi possível determinar a área de drenagem. Os resultados mostram que, para o traçado realizado, a área de drenagem estimada é de cerca de 2,5 km².

$$A_d \cong 2,51 \text{ km}^2$$

Figura 3.4 – Traçado da área de drenagem com o uso do *Google Maps*®. Em amarelo, indicação do exutório da bacia (local da barragem)



Fonte: (Google, 2016b).

Figura 3.5 – Desenho da área de drenagem via *Google Earth*®



Fonte: (Google, 2016a).

Utilizando o valor de $P_a = 1.697,5$ mm disponível em (Embrapa, 2011) acerca da estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) da cidade de Bento Gonçalves, distante cerca de 7 km do local da barragem, obteve-se, de acordo com as Equações 02, 03 e 04, valores para a vazão de referência de acordo com (ANEEL, 2001). De acordo com os resultados encontrados verificou-se que os valores de vazão de referência (Q_{est}) possuem a mesma magnitude da vazão disponível encontrada pelo método de coleta de volume de água *versus* tempo (Q_{disp}), ou seja, correspondente a 57 l/s.

$$Q_{est I} = 0,0231 * 2,51 \cong 0,058 \text{ m}^3/\text{s} \cong 57,98 \text{ l/s}$$

$$Q_{est II} = 0,0225 * 2,51^{1,003} \cong 0,057 \text{ m}^3/\text{s} \cong 56,63 \text{ l/s}$$

$$Q_{est III} = 0,0086 * 2,51^{1,004} * 1,6975^{1,783} \cong 0,056 \text{ m}^3/\text{s} \cong 55,66 \text{ l/s}$$

Desse modo, a análise da área de drenagem e equacionamento conforme as equações de regionalização tornam-se satisfatórias para a validação do valor de (Q_{disp}), fato esse que fará com que o valor obtido pelo enchimento de recipiente seja levado como base para os cálculos seguintes.

3.4. VAZÃO ECOLÓGICA (Q_e) E VAZÃO DE PROJETO (Q)

O arranjo de obras consistirá em um aproveitamento hidroelétrico de derivação, isto é, a casa de máquinas ficará distante da barragem, fazendo com que um trecho do curso d'água fique ensecado.

Nessa realidade, para evitar que o leito original do curso d'água seja extinguido, deve ser liberada pela barragem uma certa vazão de água, sem passar pelo circuito de geração do aproveitamento. Em Usinas Hidroelétricas, essa vazão, chamada comumente de vazão ecológica (Q_e), é determinada junto à Órgãos Ambientais. Sendo assim, a vazão útil, a partir de agora denominada de (Q), será uma fração da vazão total disponível (Q_{disp}), para garantir a continuidade de fornecimento de água para o curso natural. Neste trabalho, a fração considerada da vazão útil (Q) (ou seja, disponível para a geração de eletricidade) terá valor de 70% sobre (Q_{disp}). Nisso,

$$Q = 70\% * Q_{disp} = 0,70 * 57,15 \cong 40,00 \text{ l/s}$$

Portanto,

$$Q_e = 30\% * Q_{disp} = Q_{disp} - Q = 57,15 - 40,00 \cong 17,15 \text{ l/s}$$

3.5. ARRANJO PREVISTO

No aproveitamento em análise, que conta com um desnível natural (conforme Figura 3.2), é comum a instalação de centrais hidroelétricas com arranjo de derivação que, diferente do arranjo compacto, a casa de máquinas não se encontra no pé da barragem, ou seja, há um percurso de desvio do curso d'água natural. Esse desvio, por sua vez, realiza a adução da água do reservatório até as turbinas, primeiramente por um sistema de baixa pressão (constituído por um canal, túnel ou tubulação), seguido de um sistema de alta pressão (constituído geralmente de condutos forçados), que é, por fim, ligado à casa de máquinas. Aproveitamentos de arranjo compacto possuem, em geral, somente sistema de alta pressão.

A utilização de adução sob a forma de túnel é utilizada somente em grandes empreendimentos, já que o mesmo possui, ao menos, dimensões de um caminhão e/ou máquina específica para a sua escavação, o que não é justificado no atual estudo. Já para a utilização de um canal escavado para a adução, seria necessário o acesso à equipamentos de construção ao longo de todo o percurso e, como o relevo é bastante íngreme, tornaria a execução difícil e onerosa. Diante disto, para o aproveitamento hidroelétrico em análise, escolhe-se o sistema de baixa pressão constituído por tubulação.

Assim, o arranjo de obras do circuito de geração será composto por um sistema de baixa pressão via tubulação que irá conduzir a água do reservatório formado pela barragem até o ponto de conexão com o sistema de alta pressão, onde haverá uma chaminé de equilíbrio, que possui o objetivo de responder à variações de carga, em especial durante a partida e parada do conjunto turbina/gerador. Por essa razão, deve dispor de um volume para a partida e um colchão de ar a pressão atmosférica para amortecer o golpe de aríete (Flórez, 2014).

Após a passagem pela chaminé de equilíbrio, a água será então conduzida ao conduto forçado, constituindo o sistema de alta pressão que, posteriormente, é conectado ao conjunto turbina/gerador, realizando a conversão da energia hidráulica em mecânica de eixo e em elétrica, respectivamente. Após isso, a água é reestabelecida ao curso d'água natural.

A Figura 3.6 mostra a localização da barragem, o trajeto de adução entre a barragem e a chaminé de equilíbrio, correspondente ao sistema de adução de baixa pressão, pela linha de cor amarela, enquanto a linha de cor azul mostra o trajeto do conduto forçado, ligando a chaminé de equilíbrio à casa de máquinas (sistema de alta pressão). Priorizou-se o traçado que houvesse a maior queda disponível, sem contar possíveis ajustes na localização dos pontos de Casa de Máquinas que pudessem reduzir o preço de forma favorável em relação à queda de potência.

Figura 3.6 – Disposição dos pontos do aproveitamento via arranjo de derivação



Fonte: (Google, 2016a).

Os capítulos a seguir irão detalhar o dimensionamento dos principais componentes das obras civis (barragem e circuito de geração), bem como, dos equipamentos principais da casa de máquinas (turbina e gerador).

4. DIMENSIONAMENTO

A partir da determinação das cotas dos principais pontos e vazão de operação do aproveitamento, será feito o dimensionamento de todos os componentes necessários para o funcionamento da microcentral hidroelétrica.

4.1. OBRAS CIVIS

As principais obras civis do aproveitamento hidroelétrico vislumbrado neste trabalho contemplam o barramento e as estruturas que compõem o circuito de geração, incluindo: tubulação de baixa pressão, chaminé de equilíbrio e conduto forçado.

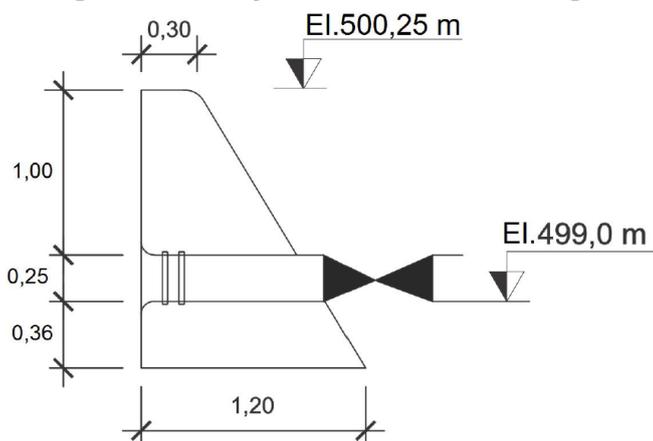
4.1.1. BARRAGEM

A barragem foi concebida com a função de garantir o afogamento da tomada d'água do sistema de baixa pressão, para que não haja entrada de ar sistema de geração. Neste sentido, é necessária uma altura de água mínima (afogamento) sobre a geratriz superior da tubulação de baixa pressão, junto à tomada d'água, também chamada de submergência. Segundo (Gordon, 1970), esta altura pode ser determinada conforme a Equação 05. O valor de C considerado foi de 1,70, que conforme (Gordon, 1970) representa uma aproximação simétrica.

$$S_b = C * v_a / \sqrt{g * d_a} = 1,7 * 0,5205 = 0,885 \text{ m} \approx 1,0 \text{ m} \quad (05)$$

O valor de 0,885 m para a submergência é, portanto, o valor estimado mínimo que a entrada da tomada d'água deve ter para garantia de uma adução afogada. Desse modo, adotou-se como submergência o valor de 1,00 m. A altura de barragem considerada foi de 1,60 m, perfazendo as medidas conforme pode ser visto na Figura 4.1, que mostra a seção transversal da estrutura, que possui a característica de funcionamento de uma soleira livre para o vertimento das vazões excedentes. Destaca-se que a parte da seção da barragem mostrada não dispõe de estruturas como descarga de fundo ou da vazão ecológica, que seriam necessárias na sua construção. Conforme medição no local, da barragem possui comprimento da ordem de 3 m, perfazendo, portanto, um volume total de, aproximadamente, 5,40 m³ (considerando a seção apresentada na Figura 4.1).

Figura 4.1 – Seção transversal da barragem



Fonte: O próprio autor.

4.1.2. SISTEMA DE BAIXA PRESSÃO

O sistema de adução de baixa pressão será via tubulação de PVC, e se estenderá por cerca de 1.270 m, correspondente ao comprimento da linha amarela na Figura 3.6. Para a minimização dos valores de perda, buscou-se um diâmetro que, conforme o princípio da continuidade, tivesse uma velocidade abaixo de 1,00 m/s. Dessa forma, verificaram-se os valores comerciais de diâmetros para dutos de PVC para satisfazer essas condições. Foi escolhido o valor nominal de 250 mm que, para uma vazão $Q = 40,00$ l/s, possui uma velocidade de adução v_a abaixo do valor limite, conforme pode ser visto na Equação 06, que demonstra o princípio da continuidade.

$$Q = v_a * A_a \leftrightarrow v_a = Q/A_a \text{ [m/s]} \quad (06)$$

$$v_a = 0,04/0,049087 \cong 0,815 \text{ m/s}$$

O desnível do trecho de baixa pressão estimado é 5,00 m ao longo dos 1.270 m de sua extensão (ou seja, a geratriz inferior no final da tubulação de baixa pressão se encontra na El. 494,00 m).

4.1.3. CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO

A chaminé de equilíbrio é a estrutura responsável por absorver as variações de carga impostas pelo sistema ou pela turbina. Sua utilização se dá como forma de proteção do sistema de adução de baixa pressão na atenuação do Golpe de Aríete, que é causado pela variação repentina de vazão em uma tubulação. Se, em um sistema com fluxo constante, há o fechamento de uma válvula, toda a energia cinética do fluido transforma-se em energia potencial, propagando-se na forma de onda de pressão, amortecidas e então dissipadas devido ao atrito interno (CAMARGO, 1989).

A necessidade de implantação de uma chaminé de equilíbrio pode ser avaliada de acordo com a relação entre o comprimento total do circuito de geração e a queda bruta H_b . Conforme (Eletrobrás, 1985), é necessária a instalação de uma chaminé de equilíbrio quando o valor da relação da Equação 07 não for satisfeito.

$$(L_a + L_c)/H_b \leq 5 \quad (07)$$

$$(1.270 + 771)/280 = 7,29 \geq 5$$

Dessa forma, verifica-se que é necessário o dimensionamento da Chaminé de Equilíbrio. Esses valores estão relacionados com o tempo de operação de válvulas ou

controles de vazão presentes no sistema. Na sequência do dimensionamento mecânico, será mostrada a forma de proteção para interrupção do sistema para o tipo de turbina escolhida.

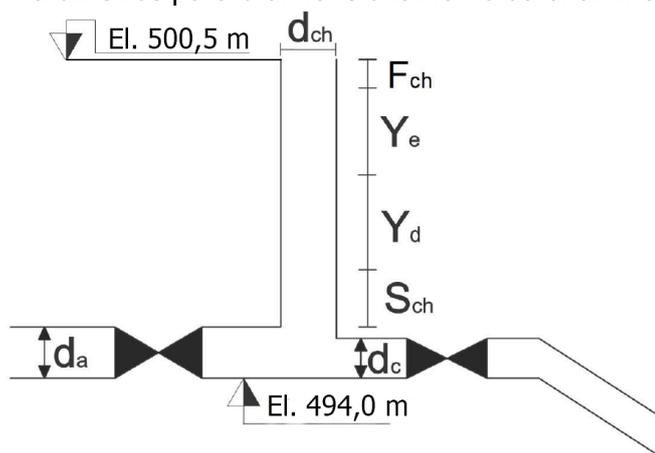
Quando o sistema está em repouso, ou seja, não há água sendo turbinada, a elevação de água no interior da chaminé se iguala ao nível d'água do reservatório da barragem, ou seja, em condições normais de operação, sob uma El. 500,25 m. Como, conforme mencionado anteriormente, o ponto final da tubulação de baixa pressão se encontra na El. 494,00 m, a altura mínima da chaminé deverá ser de 6,50 m, com coroamento na El. 500,50 m. Conforme (Eletrobrás, 1985), a área mínima da Chaminé ($A_{ch\ min}$) é dada pela Equação 08. Salienta-se que, com o objetivo de minimizações dos transientes hidráulicos, costuma-se adotar valores entre 1,5 e 3,0 o valor de $A_{ch\ min}$.

$$A_{ch\ min} = \frac{v_a^2 * L_a * A_a}{2 * g * H_{pa} * (H_b - H_{pa})} = \frac{0,815^2 * 1.270 * 0,05}{2 * 9,81 * 2,95 * (280 - 2,95)} \quad (08)$$

$$A_{ch\ min} = 0,00258\ m^2$$

A análise dos níveis de funcionamento da chaminé de equilíbrio é bastante importante para garantir que os transientes hidráulicos possam ser amortecidos. A Figura 4.2 mostra os parâmetros para o dimensionamento da chaminé.

Figura 4.2 – Parâmetros para o dimensionamento da chaminé de equilíbrio



Fonte: O próprio autor.

O nível de submersão junto à chaminé S_{ch} garante que não haverá entrada de ar no conduto forçado, enquanto Y_d , dado pela Equação 09, é a depleção máxima da água quando ocorre a abertura do conduto forçado. De mesma forma, Y_e , que possui valor idêntico à Y_d se refere ao valor máximo do nível da água no caso de um súbito fechamento do conduto forçado. Conforme mencionado anteriormente, a chaminé deverá ter uma altura de 6,50 m, para atender o nível de água normal de montante (El. 500,25 m) no caso da turbina estar inoperante. Nisso, temos que a altura da chaminé H_{ch} será dada pela Equação 10.

$$Y_d = Y_e = v_a * \sqrt{(A_a * L_c) / (g * A_{ch})} \quad (09)$$

$$H_{ch} = d_a + S_{ch} + Y_d + Y_e + F_{ch}. \quad (10)$$

Nota-se que o valor de Y_d depende da área da chaminé A_{ch} . Utilizando o valor de A_{ch} como o valor mínimo $A_{ch\ min}$, temos um valor de Y_d e Y_e de 40,46 m, aproximadamente, 14,5 % de H_b . Entretanto, caso o valor de A_{ch} for aumentado, pode-se chegar a valores para que H_{ch} tenha seu valor máximo de 6,50 m. Com isso, temos que:

$$6,50 = 0,25 + S_{ch} + Y_d + Y_e + 1,5$$

O valor de S_{ch} deve ser obtido considerando os parâmetros de dimensionamento do conduto forçado. O cálculo da submergência S_{ch} , de forma semelhante à Equação 05, é dado pela Equação 11.

$$S_{ch} = C * v_c / \sqrt{g * d_c} = 1,7 * 1,0864 \cong 1,85 \text{ m} \quad (11)$$

Com isso, após as considerações feitas, os valores referentes ao dimensionamento da chaminé são:

$$A_{ch} = 2,00 \text{ m}^2$$

$$A_{ch}/A_{ch \text{ mín}} \cong 776$$

$$d_{ch} = 1,60 \text{ m}$$

$$Y_d = Y_e = 1,45 \text{ m}$$

4.1.4. CONDUTO FORÇADO

O conduto forçado é a tubulação que liga, no dimensionamento estudado, a chaminé de equilíbrio à turbina. Ele compreende o sistema de alta pressão, pois é nessa parte do circuito que haverá os maiores esforços, com destaque para a energia potencial, causado pelo grande desnível natural estimado no local. Para conduzir a água por uma queda de, aproximadamente, $H_b = 280,00 \text{ m}$, o comprimento de conduto forçado necessário para ligar a chaminé de equilíbrio até à entrada da turbina, conforme levantamento realizado via *Google Earth®* do comprimento da linha azul na Figura 3.6, é de:

$$L_c = 771 \text{ m}$$

Conforme (Roberto Alves Braga Jr., 1999), o diâmetro de um conduto forçado de aço é dado pela Equação 12, cuja velocidade da água no seu interior não seja superior ao valor dado pela Equação 13.

$$d_c \text{ [m]} = 0,52815 * Q^{0,388} * (L_c^{0,204} / H_b^{0,204}) \quad (12)$$

$$d_c = 0,52815 * 0,04^{0,388} * (771^{0,204} / 280^{0,204}) = 0,186 \text{ m}$$

$$v_{c \text{ máx}} \text{ [m/s]} = 0,125 * \sqrt{2 * g * H_b} \quad (13)$$

$$v_{c \text{ máx}} = 0,125 * \sqrt{2 * 9,81 * 280} \cong 9,26 \text{ m/s}$$

Para verificar a condição imposta pela Equação 12, pode-se aplicar o princípio da continuidade através da Equação 06 na utilização da área de um conduto de diâmetro $d_c = 0,1863 \text{ m}$. Nisso,

$$v_c = Q/A_c$$

e

$$v_c < v_{c \text{ máx}}$$

$$v_c = 0,04/0,027 \cong 1,47 \text{ m/s}$$

$$1,47 \text{ m/s} < 9,26 \text{ m/s}$$

Portanto, é satisfeita a condição de velocidade no dimensionamento do conduto forçado. Para garantir que o conduto forçado possa suportar as pressões de operação e aquelas provenientes do Golpe de Aríete em uma situação emergencial, (Roberto Alves Braga Jr., 1999) dispõe das Equações 14 e 15, que representam a espessura necessária para suportar a pressão interna (e_p) e a espessura para suportar o achatamento (e_a).

$$e_p = 2 + 1,3 * H_b * d_c / 16 + (d_c * 100) / (30 + 1,3 * H_b) \quad (14)$$

$$e_p = 2 + 1,3 * 280 * 0,186/16 + 186/(30 + 1,3 * 280) \cong 6,28 \text{ mm}$$

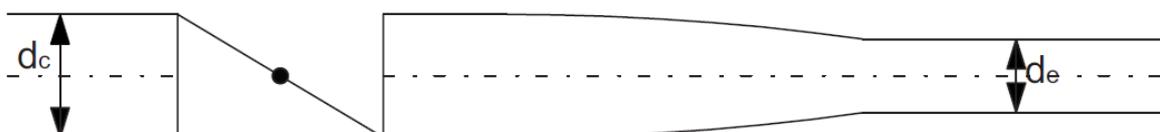
$$e_a = (d_c * 10 + 5,08)/4 = (0,186 * 10 + 5,08)/4 \cong 1,74 \text{ mm} \quad (15)$$

Conforme (Eletrobrás, 1985), deve-se utilizar uma espessura mínima e_a de 4,76 mm. Com isso, verificando os valores de e_p e e_a temos que a espessura do conduto forçado e_c deve receber o maior desses valores, de forma a satisfazer ambas as condições. Nisso,

$$e_c \cong 6,28 \text{ mm}$$

O início do conduto forçado se dá na chaminé de equilíbrio (Figura 4.2) e termina no início bico injetor da turbina tipo Pelton, cuja redução de seção é mostrada pela Figura 4.3.

Figura 4.3 – Parte Final do Conduto Forçado na entrada da Casa de Máquinas



Fonte: O próprio autor.

4.2. TURBINA

A Turbina é o equipamento no qual a energia potencial hidráulica se transforma em trabalho de eixo. A conversão pode ser feita de duas formas: quando a vazão muda somente de direção, mas não de aceleração (Turbinas de Ação) ou quando a vazão entra sob pressão e nos condutos móveis do rotor da turbina muda de direção e aceleração (Turbinas de Reação) (Flórez, 2014).

Dentro da classificação das Turbinas de Ação, destaca-se a Turbina Pelton – criada por Lester Allan Pelton em meados de 1870, que possui seu funcionamento através da incidência de um jato d'água de forma tangencial à roda, perpendicularmente com as suas pás ou conchas. Já para as Turbinas de Reação, destacam-se as Turbinas Francis e as Turbinas Kaplan; são basicamente diferenciadas pela forma do rotor. Em ambas a água flui de forma radial de fora para dentro, passando posteriormente pelo rotor e pelo Tubo de Sucção. Na turbina Francis, o rotor é posicionado logo após a entrada da água de sentido radial, enquanto que para Turbinas Kaplan, o rotor está posicionado em uma posição inferior, na qual a água cruza as suas pás que possuem forma de hélice. As Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 mostram as Turbinas Pelton, Francis e Kaplan, respectivamente.

Figura 4.4 – Turbina Pelton



Fonte: (L. Engineering, 2013).

Figura 4.5 – Turbina Francis



Fonte: (L. Engineering, 2013).

Figura 4.6 – Turbina Kaplan



Fonte: (L. Engineering, 2013).

Em geral, encontramos Turbinas Pelton em aproveitamentos que possuam um valor relativamente alto de H_b , enquanto Turbinas Kaplan, pelo contrário, são encontradas para aproveitamentos com valor relativamente alto de Q . Já a Turbina Francis está dentre esses dois extremos, onde se constata o seu amplo uso em aproveitamentos hidroelétricos, pois contemplam uma larga faixa de relação entre H_b e Q .

As novas usinas que estão sendo construídas no norte do país (UHE Jirau, Belo Monte e Santo Antônio) possuem características de alta vazão, fazendo com que se turbinas do tipo hélice de hélice, como Kaplan ou outras derivadas dessa, porém com funcionamento bastante semelhante. Já Itaipu, que conta com uma queda de cerca de 120 m, a turbina utilizada é a Francis, que possui uma larga faixa de utilização.

4.2.1. ESCOLHA DO TIPO DE TURBINA

Com o aumento nas grandezas das turbinas, foi necessário o desenvolvimento de um método para poder simular e prever o funcionamento de turbinas de grande porte, já que se torna inviável a construção de um modelo em escala real para a simulação. O rotor da Turbina Francis da Usina Hidroelétrica de Tucuruí possui um diâmetro de 8,40 m, dimensionada para uma vazão de 600 m³/s, consistindo em uma peça única de 300 t (Henn, 2012). Com isso, foi desenvolvido o conceito do uso de grandezas unitárias que, através de dados fundamentais do aproveitamento, é possível a realização do dimensionamento de todos os tipos de máquinas de todos os tamanhos, para então realizar simulações e demais procedimentos antes da construção da peça final.

No âmbito desse trabalho, se utilizará das grandezas adimensionais para primeiramente escolher o tipo de turbina e, posteriormente, o dimensionamento da peça. Uma das grandezas que define o tipo de Turbina a ser utilizada é a velocidade de rotação específica, descrita pela Equação 16, aperfeiçoada por Addison em 1966 (Henn, 2012). Obtendo o valor específico para o aproveitamento, pode-se analisar a Tabela 4.1, que mostra as faixas de valores de n_{qA} para os principais tipos de turbinas mencionados anteriormente (Henn, 2012). Considerou-se uma rotação $n_t = 1.210$ rpm, valor esse que será apresentado no dimensionamento do sistema de geração.

$$n_{qA} = 10^3 * \frac{n_t}{60} * \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt[4]{(H_b * g)^3}} = 10^3 * \frac{1.210}{60} * \frac{\sqrt{0,04}}{\sqrt[4]{(280 * 9,81)^3}} = 10,63 \quad (16)$$

Tabela 4.1 – Faixa de valores de Valores de n_{qA} para diversas turbinas

Tipo	Faixa de valores
Turbina Pelton	$n_{qA} = 5$ a 70
Turbina Francis	$n_{qA} = 50$ a 320
Turbina Kaplan	$n_{qA} = 300$ a 1.000

Fonte: (Henn, 2012).

Portanto, conclui-se que a Turbina Pelton é a mais aconselhada para o aproveitamento com os valores de n_t , Q e H_b . O resultado é satisfatório, pois a usina aqui projetada possui uma grande queda em relação à sua vazão, fazendo com que uma turbina de ação seja a mais aconselhada. Duas grandes importâncias no uso de Turbinas Pelton se dão pela facilidade construtiva de todo o conjunto, além de que o seu principal controle de velocidade se dá pela regulação de vazão no Conduto Forçado. Também se destaca que, diferentemente de Turbinas Francis e Kaplan, as Turbinas Pelton possuem uma curva de rendimento elevado quando se trabalha em faixas entre 50 % e 100 % da Vazão nominal Q (Henn, 2012), possibilitando, no caso em estudo, o funcionamento da Turbina para vazões abaixo de 40 l/s.

4.2.2. DIMENSIONAMENTO

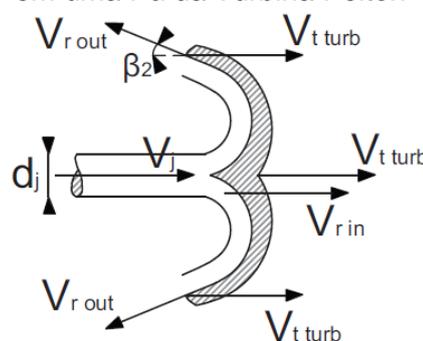
Uma vez escolhida a Turbina Pelton, busca-se agora a parametrização de todos os seus componentes, bem como a satisfatória junção entre o Conduto Forçado e a Turbina. Assim, segue-se o procedimento adotado conforme (Macintyre, 1983) para Turbinas Pelton a partir dos valores característicos do aproveitamento hidroelétrico em análise.

Os parâmetros da Tabela 4.2 mostram, em conjunto com a Figura 4.7, os parâmetros relativos ao jato d'água e as pás da Turbina. As equações para os cálculos dos parâmetros da Tabela 4.2 encontram-se no Apêndice II-A.

Tabela 4.2 – Parâmetros referentes ao jato d'água e pás da Turbina

$n_{jatos} = 1 \text{ jato}$	$v_{r \text{ in}} = 37,98 \text{ m/s}$
$v_j = 69,69 \text{ m/s}$	$v_{r \text{ out}} = 35,32 \text{ m/s}$
$d_j = 0,027 \text{ m}$	$\beta_2 = 10,00^\circ$
$v_{t \text{ turb}} = 31,71 \text{ m/s}$	$\eta_{hidr} = 89,40 \%$

Figura 4.7 – Diagrama da incidência do Jato em uma Pá da Turbina Pelton



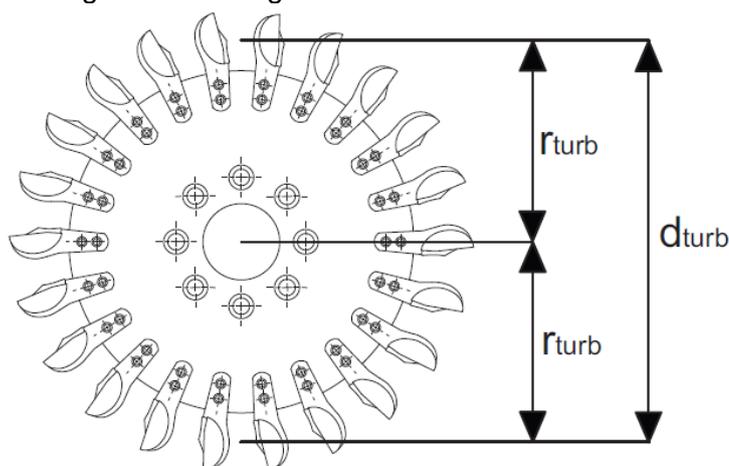
Fonte: (Macintyre, 1983).

Analisado o comportamento do jato na turbina, agora será procedido com o dimensionamento geométrico da roda, que será composta por certo número de conchas. De forma semelhante à análise do jato acima, a Tabela 4.3 mostra os valores calculados referentes à roda, cujo diagrama com a representação dos valores se encontra na Figura 4.8. Os cálculos realizados se encontram no Apêndice II-B.

Tabela 4.3 – Parâmetros referentes à roda da Turbina Pelton

$d_{turb} = 0,5005 \text{ m}$
$r_{turb} = 0,2502 \text{ m}$
$n_{pás} = 22 \text{ pás}$

Figura 4.8 – Diagrama com as medidas da roda



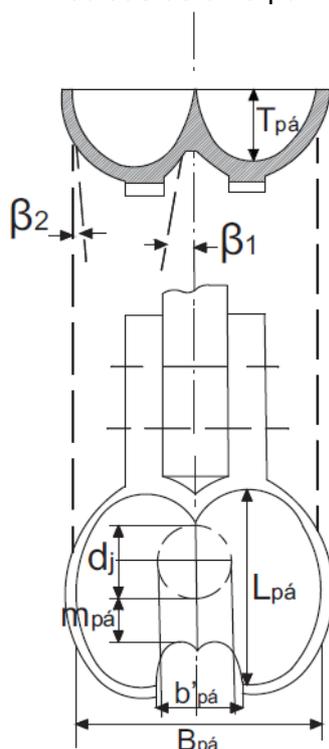
Fonte: O próprio autor.

Na Figura 4.9, pode-se ver a proporção do tamanho da pá (também chamada de concha) frente ao diâmetro da roda. Em um dimensionamento específico da pá, foram obtidos os valores da Tabela 4.4, conforme cálculos do Apêndice II-C. Esses valores, por sua vez, estão também representados na Figura 4.9. Nas Figuras 4.10 e 4.11, é possível ver o impacto do jato da água nas pás, este que possui proporções semelhantes em relação à pá, conforme obtido na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Parâmetros de dimensionamento da pá

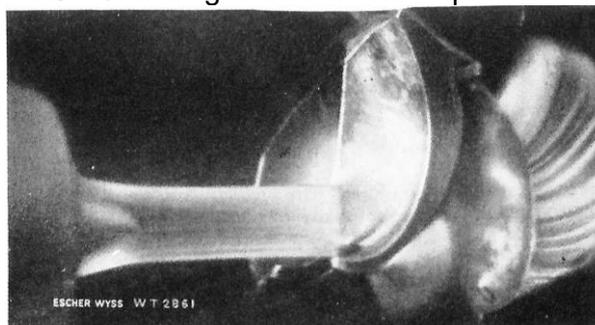
$B_{pá} = 0,068 \text{ m}$	$L_{pá} = 0,068 \text{ m}$	$m_{pá} = 0,016 \text{ m}$	$T_{pá} = 0,024 \text{ m}$	$b'_{pá} = 0,033 \text{ m}$	$\beta_1 = 10,00^\circ$
----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	-----------------------------	-------------------------

Figura 4.9 – Diagrama das medidas de uma pá



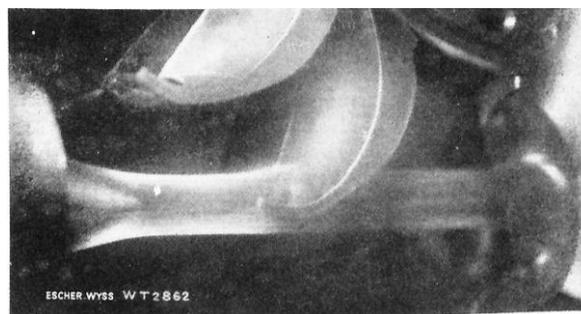
Fonte: (Macintyre, 1983).

Figura 4.10 – Jato d'água no início do impacto com uma pá



Fonte: (Macintyre, 1983).

Figura 4.11 – Jato d'água na transição entre pás



Fonte: (Macintyre, 1983).

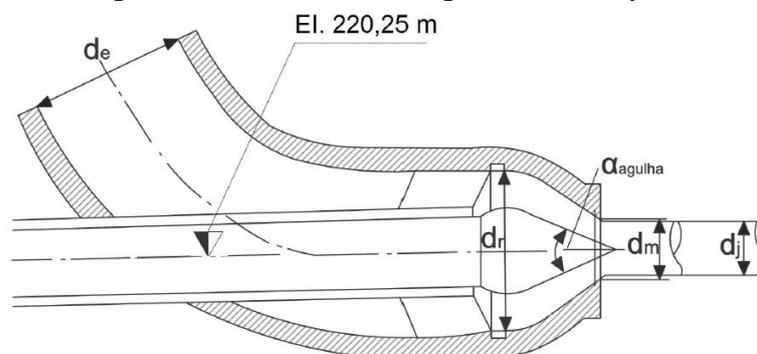
Para o total estudo dos elementos que compõem a Turbina Pelton, é necessário ainda o dimensionamento do sistema de agulha e bico injetor, que será o responsável por regular a vazão de forma dinâmica ou também como válvula de fechamento em momentos de parada do sistema. Dessa forma, a Tabela 4.5 mostra os resultados dos cálculos presentes no Apêndice II-D, referente ao dimensionamento da agulha e bico injetor. O diagrama que representa esses parâmetros se encontra nas Figuras 4.12 e 4.13. Destaca-se que o valor de d_m é ligeiramente maior que d_j devido à forma de redução do jato após sair do bico injetor, que pode ser claramente visto nas Figuras 4.10 e 4.11.

Outra parte que pode ser empregada como forma de segurança ou controle é o chamado defletor de jato. Ele consiste em uma peça que, quando necessário, se posiciona em frente ao jato com o objetivo de desviá-lo de sua trajetória até a pá. Seu uso é mais comum para situações de emergência, pois pode desviar a totalidade do jato da pá – ou seja, encerrar a sua alimentação sem causar qualquer variação na pressão da tubulação – não provocando golpe de aríete, já que sua operação ocorre após o bico injetor.

Tabela 4.5 – Dimensionamento da agulha e bico injetor

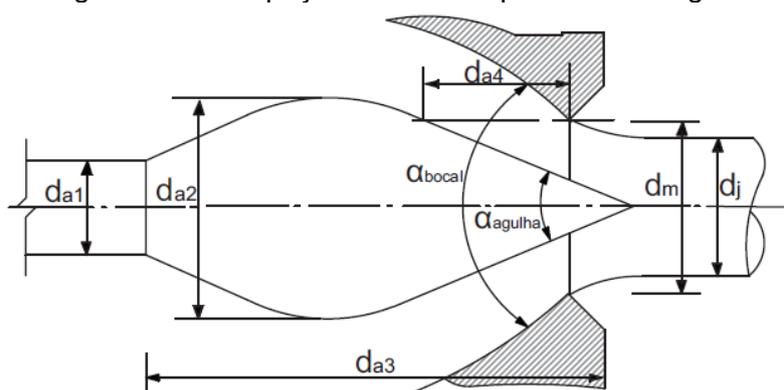
$d_j = 0,027 \text{ m}$	$d_r = 0,073 \text{ m}$	$\alpha_{agulha} = 46,00^\circ$	$d_{a1} = 0,021 \text{ m}$	$d_{a3} = 0,112 \text{ m}$
$d_m = 0,032 \text{ m}$	$d_e = 0,122 \text{ m}$	$\alpha_{bocal} = 75,00^\circ$	$d_{a2} = 0,049 \text{ m}$	$d_{a4} = 0,032 \text{ m}$

Figura 4.12 – Sistema de agulha e bico injetor



Fonte: (Macintyre, 1983).

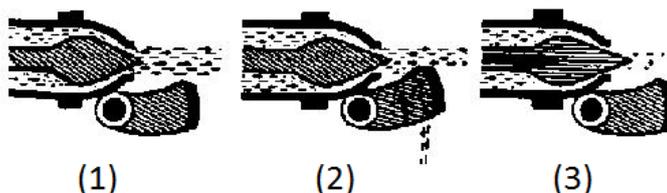
Figura 4.13 – Espaçamento e componentes da agulha



Fonte: (Macintyre, 1983).

Conforme mencionado, o defletor de jato é uma peça geralmente para uso emergencial: no caso de uma parada, o defletor irá desviar a água enquanto a agulha irá fechar o escoamento da água em um tempo muito maior, com o objetivo de reduzir o golpe de aríete causado pela variação de escoamento d'água. A Figura 4.14 mostra o uso do defletor em 3 estágios em uma simulação de necessidade de redução brusca na potência produzida, na qual o jato, primeiramente ininterrupto (1) é interceptado pelo defletor (2), este sendo novamente desativado quando a agulha assume sua nova posição (3).

Figura 4.14 – Uso do defletor como dispositivo temporário de manobra



Fonte: (Meier, 1982).

4.3. GERADOR

O Gerador é o componente de uma central de geração de energia que realiza a conversão da energia mecânica em energia elétrica. Em geral, qualquer máquina elétrica rotativa pode trabalhar como motor ou como gerador; no caso do motor, a conversão se dá na forma inversa, ou seja, a energia elétrica é convertida em energia mecânica. A conversão de energia mecânica em elétrica é explicada pelo princípio da conservação da energia aplicado ao funcionamento de um gerador, onde a frequência elétrica é dependente da velocidade da máquina motriz (Homrich, 2013), neste caso, da velocidade da turbina hidráulica.

Em centrais de grande potência, a forma de geração se dá por máquinas síncronas, ou seja, máquinas que possuem uma velocidade fixa, garantindo a frequência e assim a estabilidade do sistema elétrico. No seu rotor (parte móvel, no interior da máquina) é produzido um campo magnético que, ao se deslocar sobre os enrolamentos do estator (parte fixa, externa), induz tensão nesses enrolamentos. O campo magnético do rotor, por sua vez, deve ser alimentado por corrente contínua de alguma fonte externa, podendo ser do próprio estator após ser retificada, já que a forma de onda da tensão no estator é senoidal. Com essa configuração, o rotor é diretamente ligado à turbina, que fornece a energia mecânica, que será transformada e então utilizada na forma de energia elétrica a partir dos terminais do estator.

Diferente da máquina síncrona, existem as máquinas assíncronas que, conforme sugestão do nome, não operam na velocidade síncrona. Possuem estator de forma semelhante às máquinas síncronas, porém o seu rotor é constituído por conexões curto-circuitadas e frequentemente não possuem conexões externas. Nele, correntes alternadas fluem nesses curtos-circuitos por indução eletromagnética do campo girante do estator quando esses são alimentados por correntes alternadas. Desse modo, faz-se a analogia da máquina assíncrona (ou motor de indução, quando nos referimos na conversão elétrica em mecânica) como um transformador, em que a potência elétrica é transformada entre o rotor e o estator com uma alteração de frequência entre os lados primário e secundário (Homrich, 2013).

A não necessidade de conexão com o rotor faz com que o processo construtivo seja facilitado e, conseqüentemente, o preço da máquina seja reduzido, o que pode ser comprovado pelo vasto uso de motores de indução nos diversos ramos industriais. Dessa forma, se enfatizará o uso de um motor de indução comercial que operará sob a forma de gerador (então chamado de Gerador de Indução) para a microcentral hidroelétrica.

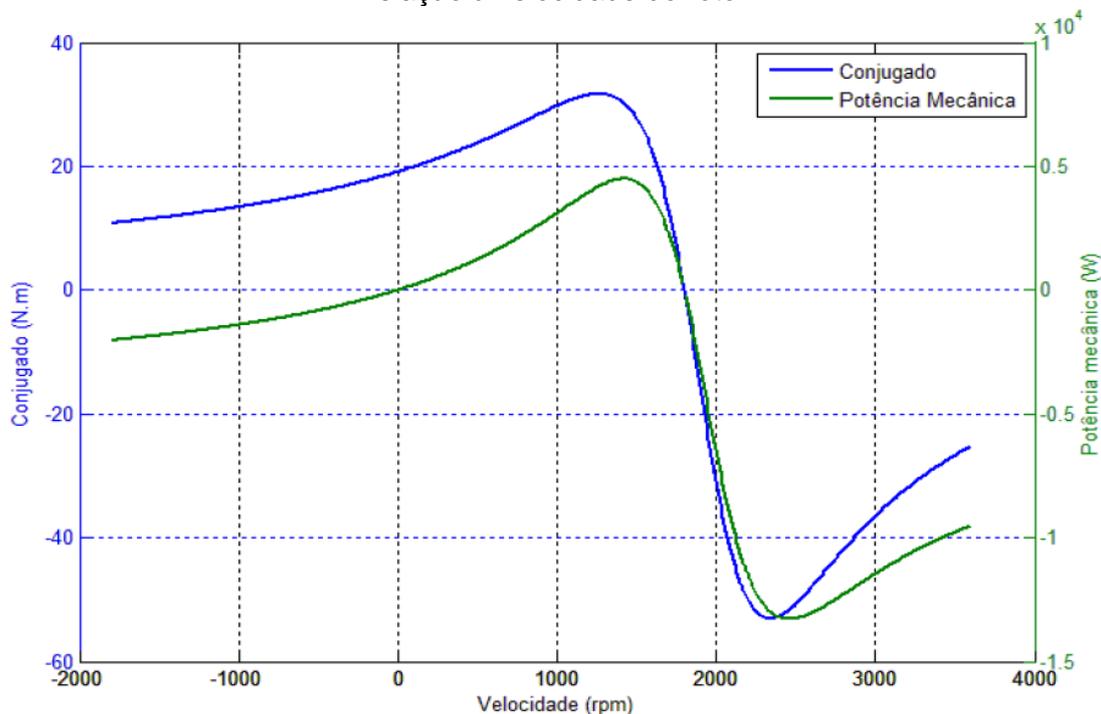
4.3.1. GERAÇÃO ASSÍNCRONA

A geração assíncrona compreende quando a rotação de operação está fora da velocidade síncrona, essa estabelecida conforme o número de pólos de uma máquina. As grandes centrais de geração utilizam a geração síncrona, para estabelecer uma frequência fixa na rede (no Brasil, 60 Hz). Em uma máquina de indução, quando o rotor está na velocidade síncrona, não há diferença entre o campo do estator e o campo induzido do rotor, fazendo com que a corrente que flui no rotor não exista. Se houver redução de velocidade (seja por atrito ou por demanda de algum sistema acoplado à máquina), a diferença entre os campos não será mais zero, induzindo tensões e conseqüentemente correntes no rotor, fazendo a máquina produzir conjugado mecânico.

A Figura 4.15, extraída de (Homrich, 2013), mostra a simulação numérica de do comportamento do Conjugado e Potência Mecânica de uma máquina de indução em relação à velocidade do rotor. Nota-se que, quando se está próximo da velocidade síncrona ($n_{sinc} = 1.800$ rpm, para o caso de 2 pólos), o conjugado reduz com o aumento da velocidade, atingindo zero exatamente quando ela é atingida. Como, em qualquer central hidroelétrica, a velocidade da máquina é determinada pela operação mecânica (controle de vazão) do sistema, caso essa velocidade seja acima de n_{sinc} , o conjugado irá inverter seu sentido, ou seja, operando sob a forma de gerador, conforme pode ser visto na parte direita da Figura 4.15. Com

isso, utiliza-se o motor de indução como gerador garantindo que a velocidade de rotação imposta pelo sistema primário seja acima de n_{sinc} .

Figura 4.15 – Simulação numérica do Conjugado e Potência de uma máquina de indução em relação à velocidade do rotor



Fonte: (Homrich, 2013).

Com isso, na fase de implantação do sistema de operação, deve-se adotar um satisfatório controle de vazão, que garantam que a velocidade do rotor permaneça na faixa acima de n_{sinc} , garantindo assim a não motorização do sistema.

4.3.2. DIMENSIONAMENTO DO CONJUNTO GERADOR

A partir do conceito de geração assíncrona, buscou-se um motor de indução que atendesse a potência disponível do eixo da turbina, onde já são descontadas as perdas referentes à parte hidráulica e mecânica. Na possibilidade de um menor custo para a máquina de indução a ser utilizada, buscou-se por uma máquina de nível comercial, dispensando a necessidade de produção de uma máquina específica para o empreendimento, o que possivelmente aumentaria o custo de sua aquisição.

Em análise de catálogo da fabricante de motores WEG, procurou-se pela máquina que mais próximo de encaixasse com a potência disponível no eixo. As principais características da máquina que melhor atendeu esses requisitos são mostradas na Tabela 4.6. Todas as características fornecidas pelo catálogo estão contidas no Apêndice III.

Tabela 4.6 – Características da máquina de indução escolhida

Fabricante:	WEG	n_{nom} :	1.190 rpm
Série:	W22 IR4 Super Premium	Potência Nominal:	90 kW
Frequência:	60 Hz	Massa:	882 kg
Tensão Nominal:	220 / 380 V	$\eta_{g 75\%}$:	95,80 %
Pólos:	6 pólos	$\eta_{g 100\%}$:	95,80 %
n_{sinc} :	1.200 rpm	Corrente Nominal:	308 / 178 A

Fonte: (WEG, 2016).

5. ANÁLISE DE PERDAS E POTÊNCIA FINAL

Nas análises de aproveitamentos hidroelétricos, é de extrema importância a análise das perdas de cargas inerentes de um sistema. Por isso, procedeu-se nas estimativas de perdas de carga que estarão presentes no funcionamento, que venham então a reduzir a energia útil total disponível. Primeiramente, parte-se da potência total disponível, que baseia-se na variação temporal da energia potencial, dado pela Equação 17. O primeiro termo da equação (vazão mássica), dado em kg/s, foi substituído pela multiplicação da massa específica ρ , dado em kg/m³ pela vazão Q , dada em m³/s. Na consideração de uma massa específica da água constante de 1.000 kg/m³, resulta em:

$$P_{total} = \rho * Q * g * H_B = 1.000 * 0,04 * 9,81 * 280 = 109,84 \text{ kW} \quad (17)$$

Logo, a potência de 109,84 kW é a potência máxima do sistema. Toda e quaisquer perdas acarretarão, portanto, numa redução desse valor. As perdas levantadas nas partes civis de um aproveitamento hidroelétrico normalmente são dadas em metros que, se levadas à Equação 17, resultam em uma perda de potência. A perda de carga H_p total é considerada como a soma das perdas maiores – também conhecidas como perdas lineares, por só dependerem do comprimento do duto, causadas por efeitos de atrito em escoamentos completamente desenvolvidos em tubos de seção constante, com as perdas localizadas, causadas por entradas, acessórios, variação de áreas, direção e demais fatores. A Tabela 5.1 mostra a classificação das perdas com as suas componentes, bem como o seu valor, cujos cálculos se encontram no Apêndice IV.

Tabela 5.1 – Perdas de Carga Hidráulica, com valores dados em metros

Perdas de Carga Lineares		Perdas de Carga Localizadas	
Descrição	Perda	Descrição	Perda
Tubulação baixa pressão	2,920 m	Tomada d'água	0,001 m
Conduto forçado	7,600 m	Mudança de seção para adução	0,001 m
Total de Perdas Lineares:	10,52 m	Grades	0,014 m
% Sobre o Total:	62,54 %	Nichos comportas	0,001 m
		Mudança de seção chaminé	0,017 m
		Mudança de seção conduto forçado	0,055 m
		Mudanças de direção conduto forçado	0,021 m
		Bico injetor e agulha	6,191 m
Total de Perdas Hidráulicas:	16,821 m	Total de Perdas Localizadas:	6,301 m
		% Sobre o Total:	37,46 %

Uma perda de 16,821 m nas partes de tubulação resulta, por fim, em uma potência perdida de 6,60 kW, quando colocado na Equação 17. Conforme (Eletrobrás, 1985), é satisfatório um valor total de perdas que representem até 5% da potência bruta disponível.

Na análise mecânica, (Macintyre, 1983) indica que Turbinas Pelton, se satisfatoriamente dimensionadas, podem ter um rendimento na ordem de 94%. Em uma estimativa conservadora, utilizou-se o valor do rendimento hidráulico (η_{hidr}) de 89,40 %, somado a uma perda de altura da água de fuga de 2,40 m (conforme cálculo no Apêndice II-B). Essas perdas, por sua vez, refletem em uma potência de 11,88 kW.

Por fim, a análise de eficiência acerca do sistema elétrico consistiu na análise do valor necessário de rendimento da máquina para que a potência final disponível seja de 75 kW, que é o teto de potência para o empreendimento ser classificado como Microgeração. Com isso, o rendimento da máquina de indução ficou em 82,09 %, valor bastante abaixo do que é

estipulado pelo fabricante quando utilizado como motor, conforme Tabela 4.6. Entretanto, espera-se que a máquina possua um rendimento inferior quando não utilizada nas condições exatas na que foi originalmente concebida.

Conforme simulação numérica de um sistema na ordem de 10 kW por (Homrich, 2013) que foi mostrado na Figura 4.15, o rendimento obtido por essa simulação ficou em cerca de 88,10 % na operação como motor e de 84,30 % na operação como gerador, ou seja, uma relação de 95,68 % na comparação de rendimentos com a troca de motorização para geração. É satisfatória a indagação de que máquinas de maior potência venham a apresentar melhores rendimentos. Considerando o rendimento nominal da máquina escolhida de 95,80 % quando operada como motor, teríamos um rendimento de 91,66 % como gerador caso fosse considerada a mesma relação da simulação do sistema de 10 kW. Dessa forma, um rendimento elétrico de 82,09 % pode, assim como na turbina, representar um valor com margem de segurança. Por fim, a Tabela 5.2 realiza a análise da contabilização das perdas e análise de rendimento total do aproveitamento hidroelétrico.

Tabela 5.2 – Análise de potências e rendimentos do dimensionamento civil, mecânico e elétrico

Grupo	Potência Disponível Inicial	Potência Perdida	Potência Disponível Final	Rendimento do Grupo	Rendimento Global
Hidráulico	109,84 kW	6,60 kW	103,25 kW	93,99 %	93,99 %
Mecânico	103,25 kW	11,88 kW	91,36 kW	88,49 %	83,17 %
Elétrico	91,36 kW	16,36 kW	75,00 kW	82,09 %	68,28 %

6. LEGISLAÇÃO DE GD EM MICROCENTRAIS HIDROELÉTRICAS

Na análise da última revisão da Resolução Normativa Nº 482 de 17/04/2012, atualizada pela Nº 687 de 24/11/2015, verifica-se diversos benefícios na implantação de uma central geradora na classe de microgeração. Um dos principais parâmetros é que os custos de melhoria e reforços de rede, quando aplicados, são por conta da concessionária, o que pode modificar de forma significativa os custos para a instalação. Também os custos referentes à medição e a manutenção dos equipamentos para esse fim são da mesma forma, de responsabilidade da concessionária. Todavia, a principal mudança no cenário se deu com as isenções fiscais impostas pelo Governo Federal, com o objetivo de fomentar o desenvolvimento de sistemas de GD.

Em 06 de Outubro de 2015 foi publicada a Lei Nº 13.169, que reduz para zero as alíquotas de PIS e COFINS referentes à energia produzida (CASA CIVIL, 2015). Em Junho de 2016, através do Decreto Nº 52.964, de 30/03/2016, o Governo do Estado do Rio Grande do Sul adere ao Convênio ICMS 16/2015 feito pelo Conselho Nacional de Política Fazendária – CONFAZ, isentando a incidência de ICMS para toda a energia elétrica produzida em uma unidade com Geração Distribuída e injetada na rede da distribuidora local (GOVERNO/RS, 2016) e (CONFAZ, 2015). Dessa forma, a isenção de todos os impostos de uma fatura de energia faz com que o valor financeiro equivalente de consumo e de geração seja o mesmo: assim, o preço ganho por kWh final produzido de energia é exatamente igual àquele que seria cobrado por um consumo regular. Vale ressaltar que para uma GD no SCEE que possua um sistema de unidades consumidoras com uma geração superior ao consumo, não é possível vender o montante de energia excedente: esse será somente contabilizado sob a forma de créditos, que deverão ser utilizados em até 60 meses, sem qualquer forma de compensação após esse período.

Os equipamentos necessários para a conexão da microcentral hidroelétrica são definidos pelo Módulo 3 do PRODIST (ANEEL, 2015). Diferente do sistema de medição, na qual sua aquisição é feita por parte da concessionária, esses equipamentos devem ser adquiridos pelo interessado. Para a realização dessa conexão no ambiente de uma

microcentral hidroelétrica, os equipamentos necessários para o acesso à rede para a potência de até 75 kW são:

✓ Elemento de desconexão	✓ Relé de sincronismo
✓ Elemento de interrupção	✓ Anti-ilhamento
✓ Proteção de Sub e Sobretensão	✓ Medição via Sistema de
✓ Proteção de Sub e Sobrefrequência	medição Bidirecional

A legislação também aborda uma consideração de perdas caso a medição de energia seja feita no lado secundário do transformador, a fim de que seja contabilizada a energia realmente entregue ao nível de tensão de distribuição, normalmente compreendido entre 13,8 kV e 34,5 kV. No nível de faturamento, utiliza-se um valor na ordem de 2,5 % de perdas de transformação (CEMIG, 2011), o que limitaria a potência entregue em 73,125 kW.

Na consideração de operação do aproveitamento hidroelétrico do presente estudo, com uma disponibilidade hídrica e de maquinário de 95 % e perdas de 2,5 %, tem-se 608.546 kWh ao longo de um ano. A partir do preço atual da energia em BT para a concessionária local RGE de R\$ 0,64178 / kWh (RGE, 2016b), com tributos totais de 35,26 %, haveria um valor compensado final de R\$ 390.554,48 ao longo de um ano. Estima-se que o custo de implantação do aproveitamento, considerando aquisição de terras, obras civis, equipamentos mecânicos e elétricos seja na ordem de R\$ 1,3 milhão. Estes valores são parâmetros para análise da viabilidade do projeto. Uma análise financeira completa, ao longo da vida útil da usina, pode ser realizada visando determinar a taxa de atratividade do empreendimento.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1. CONCLUSÃO

O conhecimento legislativo de implantação de uma unidade de geração hidroelétrica a ser conectada à rede é de extrema importância para a análise de sua inserção ao sistema. Dessa forma, neste trabalho, procurou-se apresentar as recentes alterações na legislação técnica e também fiscal referentes à uma micro ou minicentral de geração, podendo ser das mais variadas fontes. A partir desse pressuposto, realizou-se os levantamentos dos aspectos básicos do local analisado, possibilitando assim a análise técnica do ponto de vista civil, mecânico e elétrico. Salienta-se que, na realidade legislatória frente às potências estabelecidas pelas Resoluções Normativas da ANEEL, buscou-se o arranjo para o aproveitamento que permitisse uma maximização de seu valor de potência final, através do uso da máxima queda disponível.

No âmbito da energia hídrica, espera-se que o estudo sirva como diretriz para levantamentos e projetos reais de GD com o uso do SCEE, onde se salienta as isenções fiscais recentes promovidas por parte do Governo para o fomento da produção em baixa escala provenientes de fontes totalmente renováveis de energia. Juntamente, é esperado que a possibilidade de autogeração também reflita no uso racional de todas as fontes utilizadas, garantindo, assim, a consolidação de um amplo sistema elétrico, com utilização dos recursos energéticos de forma cada vez mais racional, com o balanço dos benefícios sociais, econômicos e ambientais.

Foi possível verificar que os dados levantados no estudo viabilizariam, no aspecto técnico, a implantação de um aproveitamento hidroelétrico com a potência de 75 kW, sendo classificado como microgeração hidroelétrica no âmbito regulatório. A possibilidade de construção do aproveitamento como o aqui realizado, somadas às regulamentações, padronizações e incentivos fiscais por parte do Governo nos últimos anos são fatores de grande importância para a consolidação de projetos semelhantes a esse nos mais variados locais do país.

7.2. TRABALHOS FUTUROS

Destaca-se, através da análise realizada, a possibilidade de novos estudos na área. Pode ser interessante em um próximo trabalho um estudo de alternativas de arranjo para o aproveitamento, na qual pode ser realizada, para as diferentes disposições, uma comparação entre acréscimo de potência e o custo estimado final por kW instalado – alavancando assim, uma análise financeira quanto à aquisição de terras e custos dos materiais utilizados no aproveitamento, com especial destaque para o traçado do conduto forçado, que historicamente possui um custo elevado sobre o total previsto.

Também é válida a possibilidade de sazonalização da simulação de energia elétrica gerada em uma unidade com SCEE através do levantamento de um estudo hidrológico com maior precisão, na qual seria levantada a variação da vazão disponível a ser turbinada. A energia gerada, por fim, poderia ser distribuída em unidades com diferentes comportamentos de consumo e sazonalidades (fazendo parte, assim, da modalidade de Autoconsumo Remoto ou Geração Compartilhada), na qual se buscaria o melhor cenário de alocação dessa energia para todas as unidades pertencentes desse sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANEEL. (2001). **Projeto Regionalização de Vazões Sub-Bacias 85, 86 e 87 Integrantes da Bacia 8 - Atlântico Sudeste**. Santa Maria - RS.
- ANEEL. (09 de Setembro de 2010). Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL - **Resolução Normativa Nº 414 de 09/09/2010 - Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica**. Brasília, DF, Brasil: ANEEL.
- ANEEL. (Novembro de 2011). **Por Dentro da Conta de Energia - Informação de Utilidade Pública**. Brasília, DF, Brasil.
- ANEEL. (17 de Abril de 2012). Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL - **Resolução Normativa Nº 482 de 17/04/2012 - Condições Gerais para o Acesso de Microgeração e Minigeração distribuída aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. Sistema de Compensação de Energia Elétrica**. Brasília, DF, Brasil: ANEEL.
- ANEEL. (24 de Novembro de 2015). Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL - **Resolução Normativa Nº 687 de 24/11/2015 - Alteração da Resolução Normativa Nº 482 e dos Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição - PRODIST**. Brasília, DF, Brasil.
- ANEEL. (Novembro de 2016a). **Registro de Micro e Minigeradores Distribuídos**. Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL: <http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/gd.asp>
- ANEEL. (Maio de 2016b). **Caderno Temático ANEEL de Micro e Minigeração Distribuída - Sistema de Compensação de Energia Elétrica - 2ª Edição**. Brasília, DF, Brasil.
- CAMARGO, E. L. (1989). **O Golpe de Ariete em tubulações de recalque. Análise Simplificada**. Joinville - SC: XV Encontro de Engenheiros de Assistência Técnica.
- CASA CIVIL. (6 de Outubro de 2015). **Lei Nº 13.169 de 06/10/2015 - Presidência da República - Subchefia para Assuntos Jurídicos**. Brasília, DF, Brasil.
- CBDB. (Novembro de 2016). **The Foz do Chapecó Hydroelectric Power Plant**. Fonte: CBDB - Comitê Brasileiro de Barragens: <http://www.cbdb.org.br/documentos/mbdiii/foz%20chapeco.pdf>
- CEEE, RGE e AES-Sul. (Setembro de 2012). **Regulamentação de Instalações Consumidoras de Baixa Tensão - RIC-BT - Versão 1.4**. Rio Grande do Sul, Brasil.
- CEMIG. (2011). **Manual de Gerenciamento de Energia**. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
- CONFAZ. (22 de Abril de 2015). **Conselho Nacional de Política Fazendária - CONFAZ - Convênio ICMS 16**. Brasília, DF, Brasil.
- Eletrobrás, M. e. (1985). **Manual de Minicentraís Hidrelétricas**. Brasília - DF.

- EMAE. (Novembro de 2016). **Usina Hidroelétrica Henry Borden**. Fonte: Empresa Metropolitana de Águas e Energia S.A. - EMAE: <http://www.emae.com.br/conteudo.asp?id=Usina-Hidroeletrica-Henry-Borden>
- Embrapa. (2011). **50 anos de informações meteorológicas de Bento Gonçalves - RS**. *Comunicado Técnico Embrapa Uva e Vinho nº 113*, Página 7/16.
- ENERCAN. (Novembro de 2016). **Características Técnicas da UHE Campos Novos**. Fonte: Campos Novos Energia S.A. - ENERCAN: http://www.enercan.com.br/site/pdf/enercan_caracteriticas_uhe.pdf
- Flórez, R. O. (2014). **Pequenas Centrais Hidrelétricas**. São Paulo - SP: Editora Oficina de Textos.
- Google. (2016a). **Software Google Earth Pro®** - Disponível em <http://earth.google.com>. EUA.
- Google. (2016b). **Google Maps®** - Disponível em <http://maps.google.com>. EUA.
- Gordon, J. L. (1970). **Vortices at Intakes**. *Water Power*.
- GOVERNO/RS. (30 de Março de 2016). **Decreto Nº 52.964**. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.
- Henn, É. A. (2012). **Máquinas de Fluido** (3ª ed.). Santa Maria - RS: Editora UFSM.
- Homrich, G. (2013). **Regulação de Tensão em Geradores de Indução**. Porto Alegre: Departamento de Engenharia Elétrica - UFRGS.
- L. Engineering. (Agosto de 2013). **Learn Engineering - Turbomachinery**. Fonte: Learn Engineering: <http://www.learnengineering.org/2013/08/turbomachinery.html>
- Macintyre, A. J. (1983). **Máquinas Motrizes Hidráulicas**. Rio de Janeiro - RJ: Editora Guanabara Dois.
- Meier, U. (1982). **Local Experience with Micro-Hydro Technology**. Suíça.
- RGE. (Novembro de 2016a). **Tabela PIS e COFINS - RGE**. Acesso em Novembro de 2016, disponível em Rio Grande Energia - RGE: <https://www.cpfempresas.com.br/institucional/pisconfins.aspx?emp=8>
- RGE. (Novembro de 2016b). **Tarifas de Energia do Grupo B**. Acesso em Novembro de 2016, disponível em Rio Grande Energia - RGE: <https://www.cpfempresas.com.br/institucional/tarifas.aspx?emp=D008>
- Robert W. Fox, P. J. (2010). **Introdução à Mecânica de Fluidos**. Rio de Janeiro - RJ: LTC.
- Roberto Alves Braga Jr., J. C. (1999). **Mini e Micro Centrais Hidroelétricas**. Londrina - PR: Editora UEL.
- WEG. (2016). **Catálogo de Motores de Indução de Alta Eficiência WEG Brasil**. Acesso em Setembro de 2016, disponível em WEG Brasil: <http://www.weg.net>