

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PAULO ROBERTO DE QUADROS IORRA

**ANÁLISE DO POTENCIAL DE MICROGERAÇÃO
HIDROELÉTRICA PREDIAL**

Porto Alegre

2013

PAULO ROBERTO DE QUADROS IORRA

**ANÁLISE DO POTENCIAL DE MICROGERAÇÃO
HIDROELÉTRICA PREDIAL**

Trabalho de conclusão de curso submetido ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Porto Alegre

2013

PAULO ROBERTO DE QUADROS IORRA

Este trabalho de curso foi analisado e julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Eletricista e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pela Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Aprovado em.....de.....de 2013

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Roberto Petry Homrich (Doutor) UFRGS_____

Prof. Gino Roberto Gehling (Doutor) UFRGS_____

Porto Alegre

2013

*A todos os sonhadores,
principais fontes de mudanças no mundo.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à minha família, que sempre foi minha estrutura. Obrigado por me inspirarem, torcerem por mim e me ajudarem a sempre ir mais longe. Foi necessário percorrer o caminho para entender o motivo de cada cobrança, e sou grato por isso também.

Não poderia deixar de agradecer à UFRGS, por fornecer um ensino gratuito e de qualidade.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, pelo exemplo dele como professor e pela dedicação como orientador. Poucos aceitariam o desafio de me orientar neste trabalho, e tenho convicção que não poderia ter sido melhor orientado.

Ao apoio do Prof. Dr. Gino Roberto Gehling, que sem esperar nada em troca, ajudou-me a entender parte do trabalho que foge do escopo da minha graduação e cujas observações elevaram o nível do trabalho.

De forma especial ao meu tio, Clovis Waldy Belaunzaran de Quadros, por todo apoio, não apenas como familiar, mas também como engenheiro. Tenho convicção que este apoio agregou um valor significativo ao projeto.

Aos meus colegas de curso, que durante 5 anos estiveram ao meu lado, dividindo as alegrias e tristezas, típicas de um curso de graduação em Engenharia Elétrica, em uma universidade do nível da UFRGS. Este companheirismo é provavelmente o fator mais motivante no curso.

Por fim, à todos os meus amigos. Sem esses, a vida não teria nenhuma graça.

RESUMO

Com a crescente demanda por energia elétrica, e devido a utilização cada vez maior das boas fontes energéticas renováveis e o tempo limitado de consumo limitado das fontes energéticas não renováveis, se mostra necessário pensar em novas possibilidades de geração de energia elétrica. Este projeto de diplomação consiste na análise de uma nova possibilidade: o aproveitamento do potencial de microgeração hidroelétrica predial. Com isso, deseja-se estudar a capacidade de geração de energia elétrica a partir do potencial hidráulico atualmente presente nas construções, utilizando a água da chuva, a da entrada do sistema e a água do esgoto predial. O objetivo do mesmo é a proposição de um sistema que permita, se possível, recuperar uma quantidade considerável de energia ou refutar esta idéia.

Palavras-chave: Microgeração de energia elétrica. Instalações hidráulicas. Gerador. Turbina.

ABSTRACT

With the crescent demand for electric power, and due to the increasing utilization of the good renewable energy sources and the consumption for limited time of the non-renewable energy sources, its show necessary to think in new possibilities of electric energy generation. This graduation project consists about thinking in a new possibilities of electric power: the use of the potential for building hydroelectric microgeneration. With this, it's wanted to study the capacity of electricity generation form the hydraulic potential currently present in buildings using rainwater, the input system of the building and the sewage water. The objective of it is to propose a system whereby, if possible, recover a considerable amount of energy or refute this idea.

Keywords: Microgeneration of electricity. Hydraulic installations. Generator. Turbine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática de uma IPAF	15
Figura 2: Sistema de abastecimento direto	16
Figura 3: Sistema de abastecimento indireto	16
Figura 4: Detalhes construtivos de um reservatório superior	17
Figura 5: Vasos sanitários ligados a um tubo de queda.....	18
Figura 6: Calha para telhado.....	20
Figura 7: Diagrama de pressões em contínuo.....	24
Figura 8: Turbina Pelton.....	28
Figura 9: Turbina Francis	29
Figura 10: TMB com entrada vertical	29
Figura 11: Eficiência da TMB e da Turbina Francis	30
Figura 12: Turbina Kaplan	31
Figura 13: Tipos de geradores CC.....	34
Figura 14: Diagrama de uma máquina CA de imã permanente	37
Figura 15: Modelo de um gerador síncrono	38
Figura 16: Prédio para Estudo de Caso - Corte	43
Figura 17: Prédio para Estudo de Caso - Pavimento	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Alturas de Queda e Velocidade de Rotação por Tipo de Turbina.....	28
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CA	Corrente alternada
CAF	Coluna de água fria
CC	Corrente contínua
DMAE	Departamento Municipal de Água e Esgoto
EPE	Empresa de Pesquisas Energéticas
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
NBR	Norma Brasileira
IPAF	Instalação predial de água fria
PCH	Pequena central hidroelétrica
QAV	Querosene de aviação
TMB	Turbina Michel-Bank

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	ESTUDO HIDRÁULICO	14
2.1	INSTALAÇÕES PREDIAIS DE ÁGUA FRIA	14
2.2	INSTALAÇÕES PREDIAIS DE ESGOTO SANITÁRIO	18
2.3	ESCOAMENTO DA ÁGUA DA CHUVA.....	19
2.4	SUGESTÕES DE ALTERAÇÕES NAS INSTALAÇÕES HIDRÁULICAS PREDIAIS	20
2.4.1	A fio d'água	21
2.4.2	Utilização de reservatórios	21
2.5	CARACTERÍSTICA DAS CARGAS HIDRÁULICAS.....	23
2.5.1	Carga no reservatório inferior	23
2.5.2	Carga relativa ao esgoto	24
2.5.3	Carga relativa à chuva	27
2.6	EQUAÇÃO DA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA.....	27
2.7	PERDA DE CARGA.....	27
2.8	ESCOLHA DA TURBINA	28
2.8.1	Turbinas hidráulicas	28
2.8.2	Bombas de água como turbinas	31
2.9	POSICIONAMENTO DOS GERADORES.....	32
3	ESTUDO ELÉTRICO	33
3.1	ESCOLHA DO TIPO DE GERADOR	33
3.1.1	Geradores CC	33
3.1.1.1	Excitação independente	34
3.1.1.2	Excitação série	34
3.1.1.3	Excitação em derivação	35
3.1.1.4	Excitação composta	35
3.1.1.5	Excitação por ímãs.....	35
3.1.2	Geradores CA	36
3.1.2.1	Geradores de indução	36

3.1.2.2	Geradores síncronos	37
3.2	TRANSITÓRIOS E QUALIDADE DA ENERGIA GERADA	39
3.3	DESTINO DA ENERGIA GERADA	40
4	ESTUDO DE CASO	43
4.1	APROVEITAMENTO DA PRESSÃO NORMAL DA REDE HIDRÁULICA PÚBLICA	45
4.2	APROVEITAMENTO DA ÁGUA DA CHUVA	46
4.3	APROVEITAMENTO DO ESGOTO	48
4.4	SOMATÓRIO DOS APROVEITAMENTOS	49
5	VIABILIDADE ECONÔMICA	51
5.1	RECEITAS	51
5.2	CUSTOS	52
5.2.1	Custos iniciais.....	52
5.2.2	Custos operacionais	53
5.3	CONCLUSÃO FINANCEIRA	53
6	CONCLUSÃO E SUGESTÕES	55
	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

A necessidade da produção de energia elétrica é algo indiscutível e inegável. Cada vez mais se utiliza este tipo de energia em todos os setores da sociedade. Tanto para fins produtivos como para fins de lazer, variando de fábricas até lares, é possível achar equipamentos que utilizam este tipo de energia.

Entretanto, esta alta demanda resulta em alguns problemas complexos. Visto que, de acordo com a EPE, a demanda por energia elétrica cresce acima do PIB, é possível observar que a tendência é uma maior necessidade de geração de energia com o passar do tempo. Sabe-se pela lei da escassez que há uma quantidade finita de recursos, ou seja, que há um limite para a geração de energia elétrica, mas, que a tendência é o consumo crescer de forma a gerar uma necessidade de energia que tende a um valor muito elevado. Para esta equação equilibrar-se, é possível atuar tanto em diminuir o consumo quanto em aumentar a geração.

Visto que é complicado prever as aplicações futuras que utilizarão energia elétrica, é difícil prever a demanda de energia elétrica num prazo muito longo, além de ser oneroso diminuir o consumo da mesma. Ao mesmo tempo, é possível propor novas formas de geração a partir do conhecimento disponível, além de aprimoramentos nas formas atuais de geração, como forma de equilíbrio na relação entre demanda e produção. Não necessariamente todas as proposições se tornarão soluções (e nem se espera que uma proposição solucione este problema de forma avulsa), mas todo o trabalho realizado neste sentido pode ser a diferença entre a estabilidade ou uma crise energética.

É bastante razoável pensar que neste caminho deve-se valorizar ideias que sejam pensadas sem a utilização de combustíveis fósseis, que sabidamente esgotar-se-ão num futuro não muito distante e produzem um grande impacto ambiental. De forma preferencial, deve-se trabalhar em soluções que se utilizarão de energias renováveis, pois estas ideias podem ser soluções energéticas por períodos indeterminados.

Logo, a partir da explanação acima, este trabalho propõe-se a tentar aumentar a possibilidade de geração de energia elétrica de forma renovável, a partir da produção de energia, utilizando-se de pontos com potencial energético em instalações hidráulicas prediais, aproveitando a energia que normalmente seria dissipada, para ajudar a solucionar este problema. Desta forma, investe-se em sustentabilidade na geração de energia elétrica, cujo preço tende a subir com o tempo.

A geração de energia elétrica é um desafio moderno, tanto devido ao impacto ambiental da construção de usinas e redes de transmissão quanto pelo custo financeiro. Mesmo usinas de

pequeno porte possuem grandes chances de terem implementações complexas e demoradas. Além disso, do consumo crescente de energia, atrelado ao fato de pontos potenciais de geração de energia renovável estarem cada vez mais ocupados e ao fato de que a geração por vias não renováveis possui tempo finito, ocorre a necessidade de soluções cada vez mais eficientes para geração e transmissão, de forma a diminuir o desperdício. Obviamente, um uso mais consciente desta forma de energia é sempre razoável, mas trabalhar apenas com um lado do problema não é uma solução inteligente, principalmente em locais com potencial de crescimento tão alto, como é o caso do Brasil.

O aumento de eficiência nem sempre ocorre apenas alterando-se formas atuais de geração, transmissão e consumo de energia elétrica. Muitas vezes, uma nova tecnologia é necessária para aumentá-la, e quando esta tecnologia pode ser implementada no sistema atual, com poucas alterações ou até sem nenhuma alteração, é possível diminuir o impacto futuro e aumentar o potencial de energia máxima disponível para consumo, dois fatores extremamente desejados.

É necessário ter consciência de que este projeto não pretende descartar nenhuma forma atual de geração de energia elétrica, apenas pretende tornar o sistema mais eficiente devido à recuperação de energia, que normalmente seria perdida nas tubulações prediais. Obviamente, apenas por este sistema é impossível alimentar de forma autônoma toda uma instalação predial, entretanto, este não é o objetivo deste trabalho. Pretende-se fornecer apenas mais uma possibilidade de geração de energia alternativa, de forma a tornar a construção um pouco mais sustentável nos vieses ecológico e energético, complementar ao sistema de energia.

Esse trabalho tem por objetivo realizar um estudo sobre a geração de energia elétrica a partir do potencial hidroelétrico predial; as vantagens, desvantagens e dificuldades desse sistema a ser proposto; os requisitos elétricos e estruturais de projeto; um estudo de caso analisando a viabilidade técnica; e um estudo econômico de forma a pensar na viabilidade financeira da implementação.

Este trabalho foi dividido nos seguintes capítulos: estudo elétrico, estudo hidráulico, estudo de um caso e viabilidade econômica. No capítulo 2 abordam-se as questões relativas à estrutura hidráulica das instalações prediais e como elas podem ser aproveitadas para o referido tema. No capítulo 3 é realizado um estudo sobre a parte elétrica, ou seja, sobre os geradores mais adequados e sobre como utilizar a energia gerada de forma mais apropriada. O capítulo 4 refere-se a um estudo de caso hipotético a partir das explicações e dados obtidos nos capítulos 2 e 3. O capítulo 5 apresenta um estudo financeiro sobre a aplicação da ideia considerando a atual conjuntura econômica. E, finalmente serão apresentadas as conclusões do trabalho.

2 ESTUDO HIDRÁULICO

Para esta proposta, tão importante quanto o estudo elétrico, é um estudo hidráulico do caso. Apenas compreendendo sistema é possível obter os pontos potencialmente bons e como otimizá-los de forma que o sistema pode tenha sua capacidade maximizada sem prejudicar o usuário, de forma a não alterar a qualidade do serviço de obtenção de água e liberação do esgoto.

2.1 INSTALAÇÕES PREDIAIS DE ÁGUA FRIA

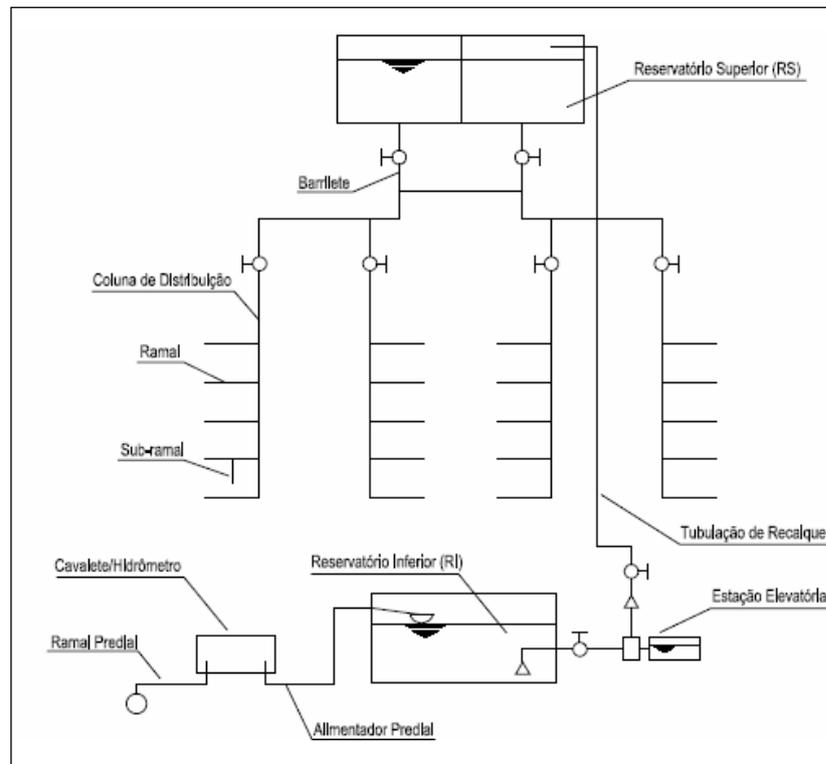
Antes de realizar propostas é necessário compreender, mesmo que de forma resumida, como que funcionam atualmente as instalações prediais de água fria (IPAF) de um prédio e as instalações hidrosanitárias.

As IPAF devem ser executadas de acordo com a NBR-5626/98 – Instalação predial de água fria – da ABNT e, dependendo do local, de acordo com resoluções locais (como é o caso de Porto Alegre, com o Decreto nº 9369/88 do DMAE – PMPA).

De acordo com Gehling (2010) um sistema de IPAF, conforme apresentado na figura 1, a seguir é atualmente composto basicamente por:

- a) ramal predial - tubulação entre a rede pública de abastecimento e o prédio;
- b) hidrômetro - mede o consumo de água;
- c) ramal de alimentação - tubulação entre o hidrômetro e a entrada do reservatório de acumulação;
- d) extravasor - avisa o mal-funcionamento da válvula da boia, dirigindo a descarga;
- e) sistema de recalque - possibilita o transporte de água do reservatório inferior para o reservatório superior e é composto pela canalização de sucção, conjunto motor-bomba e canalização de recalque;
- f) reservatório superior - reservatório ligado ao alimentador ou à tubulação de recalque, destinado a alimentar a rede predial de alimentação;
- g) colar ou barrilete – liga o reservatório superior às colunas de água fria;
- h) colunas de água fria (CAF) – canalização vertical que parte dos barriletes e abastece os ramais de distribuição de água;
- i) ramal - ligação entre as CAFs e os sub-ramais;
- j) sub-ramal - canalização que conecta os ramais dos aparelhos de utilização.

Figura 1: Representação esquemática de uma IPAF



Fonte: GEHLING, 2010.

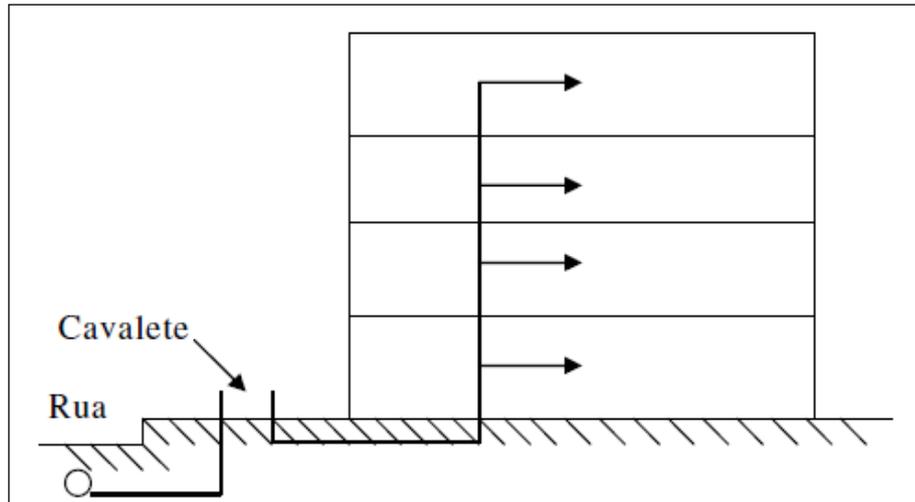
Um sistema de distribuição pode ser alimentado pelo sistema direto ou pelo sistema indireto por gravidade (com a utilização de um reservatório superior). O sistema direto realiza o abastecimento de água diretamente a partir da rede de abastecimento (Sistema de abastecimento direto - figura 2), sendo necessário verificar a possibilidade a partir do diagrama de pressões em contínuo fornecido pela prestadora dos serviços de abastecimento (em que se obtêm informações sobre a pressão média em um local de interesse). Mesmo em situações em que o sistema direto é possível de ser realizado, muitas vezes ele deve ser evitado, como é o caso de edifícios.

O sistema indireto exige, no mínimo, um reservatório (caixa d'água), entretanto, torna possível o consumo de água até em eventos de falta de água na rede pública. Dependendo das circunstâncias, adota-se apenas reservatório (figura 3a) superior ou reservatório superior e inferior (figura 3b).

O sistema com apenas reservatório superior é utilizado quando a pressão na rede pública é satisfatória, de forma que a mesma não compromete o enchimento do reservatório superior, enquanto o reservatório inferior, conjunto elevatório e conjunto superior são utilizados quando a rede pública não permite o abastecimento direto do reservatório superior, com vazão pelo menos igual ao consumo diário (GEHLING, 2010). Desta forma, a

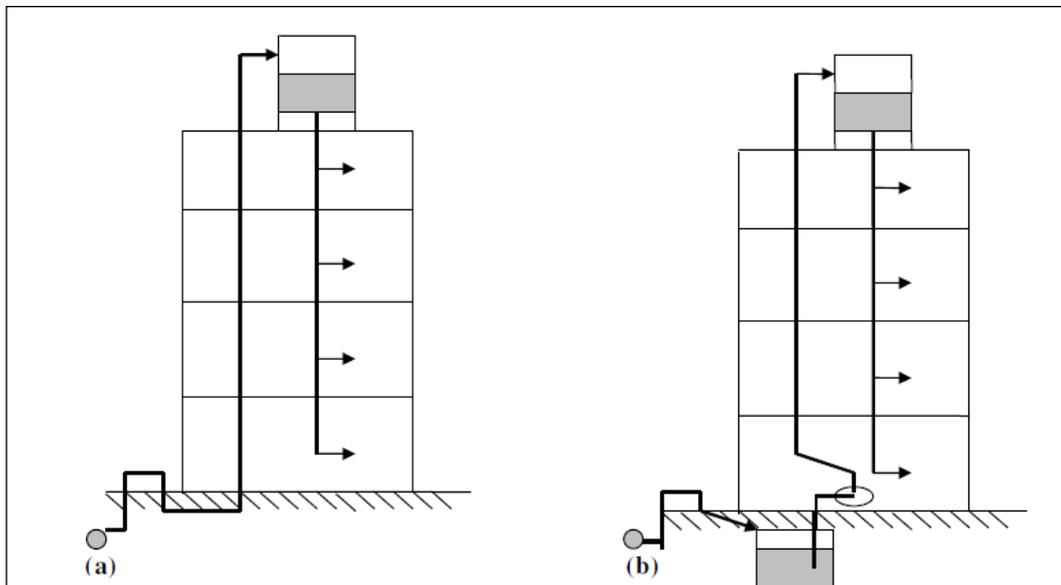
alimentação da rede pública abastece o reservatório inferior e, após isto, a água é bombeada para o reservatório superior. É bastante interessante reparar que a pressão nesse caso é desperdiçada, mostrando-se assim um ótimo ponto para geração de energia.

Figura 2: Sistema de abastecimento direto



Fonte: GEHLING, 2010.

Figura 3: Sistema de abastecimento indireto



Fonte: GEHLING, 2010.

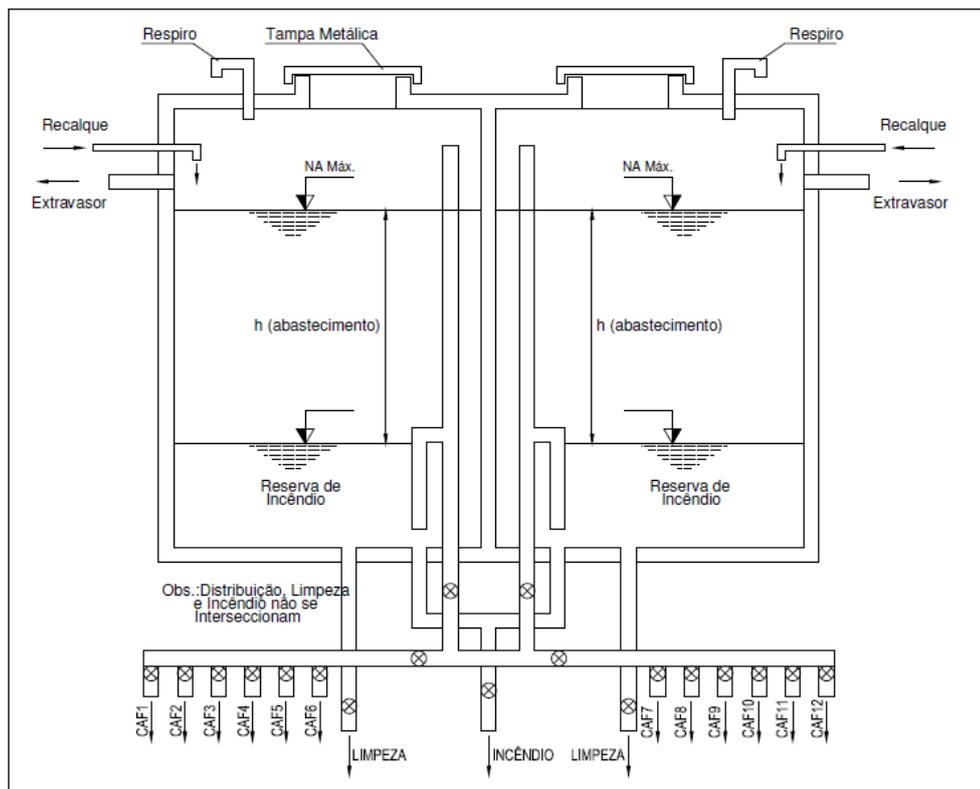
Em Porto Alegre, de acordo com o Decreto 9369/88 do DMAE-PMPA, o reservatório inferior é obrigatório para qualquer prédio com mais de quatro pavimentos acima do nível da rua. Há outros tipos de distribuição, mas, devido a pouca utilização, serão desconsiderados nesse trabalho.

É interessante detalhar como funciona o reservatório superior (figura 4). O mesmo possui dois “blocos” separados, de forma que seria possível limpá-lo sem interromper a distribuição de água (fato que normalmente não ocorre). Cada “bloco” possui três saídas independentes: CAFs, limpeza e incêndio.

É bastante razoável considerar que nenhum gerador deve ser colocado na coluna relativa à tubulação para incêndio. Os motivos são óbvios: a segurança deve ser prioridade (neste caso, segurança significa que a pressão da água em casos de incêndio deve ser a máxima possível) devido ao fato de que durante um incêndio provavelmente o sistema elétrico deverá estar desligado. Sendo assim, é dificultado ou até impossibilitado o aproveitamento ou armazenamento desta energia.

A colocação de geradores nas colunas dos usuários ou da limpeza pode comprometer a pressão de água de forma grave, além de terem um potencial muito baixo de geração. Com isto, é razoável que nenhum gerador seja colocado logo após o reservatório superior.

Figura 4: Detalhes construtivos de um reservatório superior

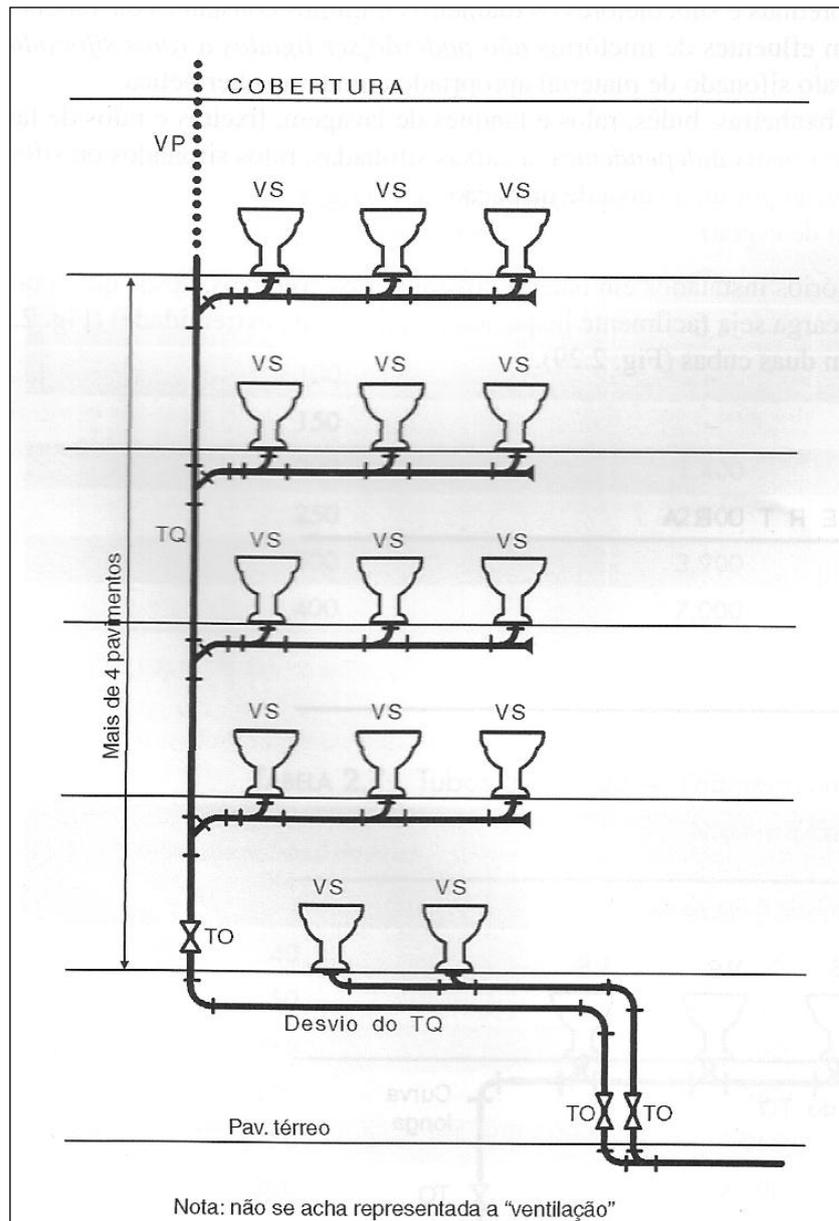


Fonte: GEHLING, 2010.

2.2 INSTALAÇÕES PREDIAIS DE ESGOTO SANITÁRIO

Para as instalações prediais de esgoto sanitário (figura 5) são utilizadas as recomendações e prescrições da NBR-8160/99 - Sistemas prediais de esgoto sanitário - Projeto e execução. Além disto, em Porto Alegre, é utilizado o Decreto n° 9369/88.

Figura 5: Vasos sanitários ligados a um tubo de queda



Fonte: MACINTYRE, 2010.

De acordo com Gehling (2010), os objetivos das instalações prediais de esgotos sanitários, representados na figura 5 são:

- a) permitir um rápido escoamento e facilitar desobstruções;
- b) vedar a passagem de gases e animais das tubulações para o interior das edificações;
- c) não permitir vazamentos, escape de gases e formações de depósitos no interior das tubulações;
- d) impedir a poluição da água potável.

As instalações de esgoto devem ser ventiladas, de forma que os gases no seu interior sejam conduzidos até a atmosfera, evitando assim uma pressão excessiva causada pelos mesmos, o que poderia destruir as instalações.

As instalações de esgoto devem ser preferencialmente retilíneas, visto que um objetivo é a eliminação rápida do mesmo. Assim como nas CAFs, para as instalações prediais de esgoto sanitário há várias colunas de descida. As colunas encontram-se no nível térreo ou subsolo para a entrega do material ao esgoto público. Visto que as instalações de esgoto são compostas por trechos o mais retilíneo possíveis e que o deslocamento do mesmo ocorre devido à gravidade, torna-se interessante uma análise quanto ao potencial de aproveitamento do mesmo.

É interessante ressaltar que, enquanto o esgoto está dentro do prédio ainda pertence aos condôminos, e os mesmos podem realizar o que quiserem com este esgoto, desde que não prejudiquem outras pessoas. Com isto, a utilização do esgoto para geração de energia elétrica pode ser considerada.

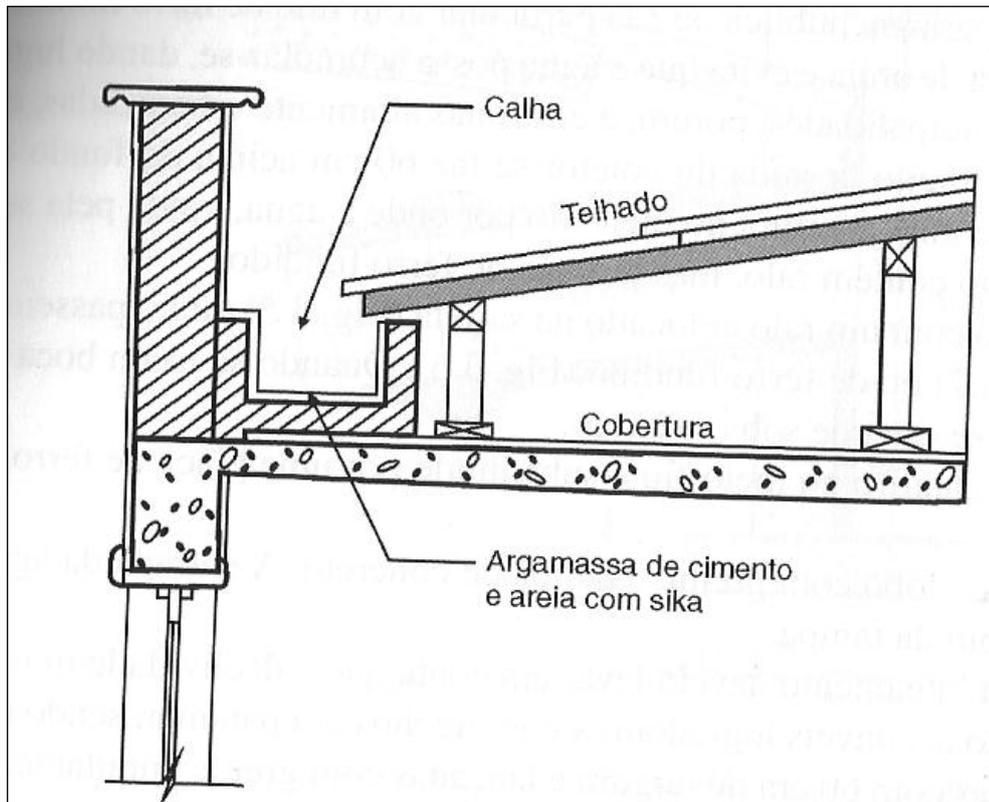
2.3 ESCOAMENTO DA ÁGUA DA CHUVA

De acordo com Macintyre (2010), um estudo da precipitação pluvial visa obter dados para o projeto de meios de coleta e condução das águas da chuva de maneira segura, de modo a evitar inundações em edificações ou nos logradouros públicos. Em alguns locais as águas pluviais não podem ser escoadas para a mesma tubulação que o esgoto domiciliar, de forma que estas águas necessitam de tubulações especiais.

A NBR-10844/1989 – Instalações Prediais de Águas Pluviais rege as instalações de esgotamentos de águas pluviais em prédios de qualquer porte (além de outras áreas limitadas). As águas de terraços e telhados são escoadas por gravidade para o coletor da via pública, como no exemplo da figura 6. É interessante observar que a água que cai em todo o telhado é direcionada para as calhas horizontais, que direcionam a vazão para uma ou algumas tubulações verticais cujo objetivo é escoar a água para baixo, indicando que o aproveitamento deste tipo de carga pode ser bastante simples de ser implementado. É de extrema importância

proteger este encanamento de itens como folhas, utilizando grades, de forma a evitar o entupimento do mesmo (preocupação que se torna ainda mais válida se for considerada a presença de um gerador nesta tubulação).

Figura 6: Calha para telhado



Fonte: MACINTYRE, 2010.

2.4 SUGESTÕES DE ALTERAÇÕES NAS INSTALAÇÕES HIDRÁULICAS PREDIAIS

No modelo atual, qualquer aproveitamento que não seja realizado entre a rede pública de água e o reservatório inferior é bastante complicado. Qualquer interferência na IPAF pode comprometer seriamente a utilização da água pelos condôminos.

A utilização do esgoto possui problemas ainda maiores: inconstância da carga (que é estocástica), possibilidade de entupimentos, diferenças de altura muito relevantes, entre outros. Apesar disto, é mais plausível realizar alterações que tornem possível a utilização do esgoto, visto que alterações neste trecho, se bem realizadas, impactam muito menos os usuários.

A primeira alteração necessária para o funcionamento é construir separadamente a descida de esgoto estritamente líquido e a descida de esgoto que pode causar entupimento, como, principalmente, vasos sanitários. Com a construção de tubos de descida exclusivos para

parte dos dejetos que causam a maior parte dos problemas, é necessário pensar nos problemas restantes, de forma a continuar achando as alternativas necessárias à resolução dos problemas.

Devido ao modo como a energia será gerada, ou seja, a partir de quedas de água que girarão turbinas, é possível pensar em parte do problema como se fosse uma PCH. Assim como em PCHs, é possível pensar na utilização do esgoto de duas maneiras: com reservatórios e a “fio d’água”, ou seja, a partir do fluxo natural (FARRET, 1999).

2.4.1 A fio d’água

PCHs a fio d’água são pequenas centrais hidroelétricas que não possuem reservatório, funcionando apenas de acordo com o fluxo do curso d’água em determinado momento. No caso do modelo no prédio ser pensado de forma análoga, são poucas as alterações necessárias.

A primeira alteração necessária foi citada acima, que é a construção de uma saída de esgoto exclusiva para vasos sanitários. Outra alteração, igualmente óbvia, é a inserção dos geradores no sistema. No caso hidráulico, a inserção das turbinas do gerador.

Como o desejado é maximizar a carga, é interessante que o caminho para a turbina apresente o menor número possível de desvios durante a queda. Entretanto, o gerador pode precisar de manutenção e para isto pode ser necessário que a turbina não seja acionada. Logo, para tal, é necessária a construção de um sistema que permita, a partir de válvulas e registros, desviar o curso do esgoto do gerador sempre que necessário.

2.4.2 Utilização de reservatórios

Reservatórios são utilizados em várias PCHs e em todas as usinas hidroelétricas de maior porte. Eles permitem um controle maior do fluxo e até um planejamento quanto à carga. Mas, para isto, necessitam de mais alterações.

Além de todas as alterações necessárias no caso acima, é necessário, obviamente, a construção do reservatório, que irá ocupar um espaço significativo da construção. O reservatório deve ser construído de forma a recolher a água de andares superiores. O mesmo não deve estar no nível do apartamento, pois isto comprometeria o escoamento da água, entretanto, se ele for posicionado muito abaixo, potencial hidráulico desnecessário será perdido. Como sugestão, um reservatório no n-ésimo andar poderia armazenar esgoto do n+1-ésimo andar.

O número de reservatórios é outro fator que necessita ser pensado. Caso apenas um reservatório seja colocado, idealmente, ele deve ficar aproximadamente na metade da altura do prédio. Esta conclusão é fácil de ser obtida: a energia gerada é função da altura da queda e da quantidade de água por queda. Um reservatório muito alto possui uma queda de água muito significativa, mas possuirá um baixo volume de água, afinal coletará água de poucos andares, e um reservatório colocado muito abaixo terá o problema inverso. Se for considerado um prédio hipotético com apenas um reservatório em que todos os usuários consomem a mesma quantidade de água e todos os andares possuem o mesmo número de moradores e mesma altura, conclui-se que idealmente é possível recuperar no máximo 25% da energia utilizada para bombear a água para cima, o que é pouco.

O raciocínio acima leva a concluir que, ao invés de apenas um reservatório, pode ser mais interessante a utilização de mais reservatórios. Caso dois reservatórios sejam utilizados, eles devem localizar-se em aproximadamente 1/3 e 2/3 da altura do prédio, de forma a recuperar idealmente no máximo 33% da energia (22% devido ao reservatório superior, devido a 1/3 da carga estar a 2/3 da altura e 11% devido ao reservatório inferior, por raciocínio análogo), o que continua sendo pouco, mas é uma melhora. Além disto, um número maior de reservatórios indica que o volume por reservatório necessário passa a ser menor (mas, é importante salientar que o volume total de reservatório passa a aumentar).

Por indução matemática, pode-se concluir que, neste método, idealmente, a máxima energia recuperada é de aproximadamente:

$$\%e(n) = \sum_{1}^{n-1} \frac{x}{n^2} \quad (1)$$

Onde: %e(x) é a porcentagem máxima de energia recuperável do bombeamento;

n é o número de reservatórios (máximo de 1 por andar);

x é a variável do somatório.

Pode-se simplificar esta expressão um pouco. Visto que o somatório é uma progressão aritmética:

$$\%e(n) = \frac{1}{n^2} \frac{n \cdot (n - 1)}{2} \quad (2)$$

Simplificando, a equação resulta em:

$$\%e(n) = \frac{(n - 1)}{2n} \quad (3)$$

Considerando um prédio com número de andares tendendo ao infinito e utilizando-se reservatórios em todos os andares, é possível recuperar idealmente no máximo 50% da

energia elétrica utilizada para bombear a água. Com isto, é possível concluir que a melhor alteração possível, neste caso, é a opção de um reservatório por andar.

O volume dos reservatórios depende de como se deseja aplicar este sistema. Considerando que, de acordo com a ANEEL, brevemente a energia elétrica poderá ser tarifada de acordo com o horário, torna-se interessante cogitar reservatórios com volume da produção média de esgoto em um dia de um andar (desconsiderando o vaso sanitário), acrescido de um coeficiente de segurança, visto que a quantidade de esgoto varia de um dia para o outro. Esta estimativa pode ser realizada a partir da quantidade média de esgoto produzida por dia por pessoa, que é de aproximadamente 200 litros por pessoa, de acordo com Macintye (2010), menos o volume médio de esgoto produzido no vaso sanitário por pessoa, que é de 10 a 12 litros por descarga, de acordo com o autor, multiplicado pelo número de vezes que um usuário médio utiliza o vaso sanitário por dia. O coeficiente de segurança necessária do desvio padrão da produção de esgoto, um dado um tanto complicado de ser obtido, mas, com estudos apropriados para o público alvo, possível de ser obtido.

2.5 CARACTERÍSTICA DAS CARGAS HIDRÁULICAS

Foram definidos três tipos de carga, a carga do reservatório inferior (quando possível, visto que nem todas as edificações possuem), a carga relativa ao esgoto e a carga da chuva. Além disto, existe a possibilidade de operar a fio d'água ou com reservatório. Ambas as cargas possuem características diferentes entre si.

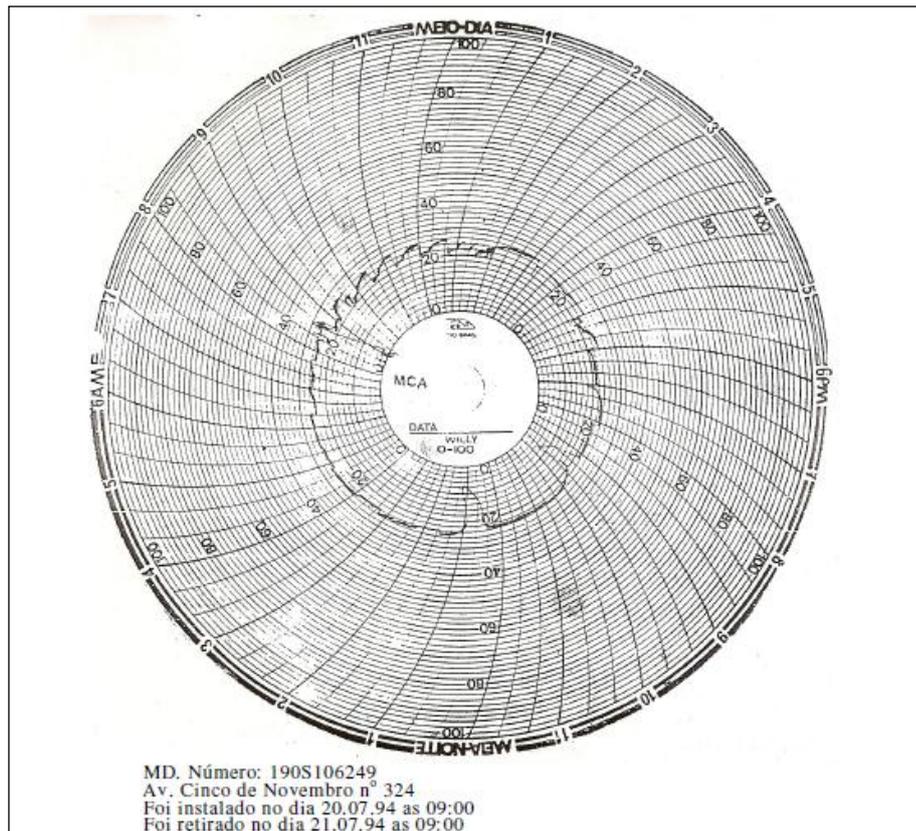
2.5.1 Carga no reservatório inferior

A carga relativa ao reservatório inferior apenas pode ser operada a fio d'água, visto que, aproveita exatamente a pressão da água que chega do ramal público. A carga chega em instantes diversificados, de acordo com a entrada de água da rede pública no sistema. A entrada de água ocorre de acordo com o nível da própria caixa d'água, que é controlado por uma boia. Quando a mesma está baixa, ela permite a abertura de uma válvula, que permite vazão de água até o ponto em que a boia atinja uma altura determinada, quando então a válvula se fecha.

De acordo com o artigo 31 do regulamento dos serviços de água e esgoto da CORSAN, a água deve chegar do ramal público com pressão mínima equivalente a 10 metros de coluna de água e máxima de 40 metros de coluna de água. Em cidades como Porto Alegre,

é possível solicitar ao DMAE um diagrama de pressões em contínuo como mostra a figura 7 de forma a ser obtida a informação de pressão média para o logradouro com facilidade. Com o valor da pressão, é fácil dimensionar o gerador para que o mesmo possua o melhor rendimento possível, visto que a curva de rendimento do gerador depende da carga.

Figura 7: Diagrama de pressões em contínuo



Fonte: GEHLING, 2010.

2.5.2 Carga relativa ao esgoto

A característica da carga depende do modo em que o projeto for pensado. Caso seja pensado como no modelo a fio d'água, a carga é estocástica, de forma que sua distribuição no tempo é pouco previsível. Este é um fator extremamente complicante, visto que a intensidade, altura de queda e intervalo de tempo em que ocorre é somente probabilístico. Entretanto, este modo de operação aproveita as quedas ao máximo, visto que o reservatório significa uma perda de altura.

Caso seja utilizado o modelo com reservatório, a carga torna-se totalmente previsível, visto que o reservatório pode ser esvaziado sempre que um comando que solicitar isto ocorrer. Este comando pode ser em horários fixos (de forma a gerar energia em horários interessantes

para tal, como em horários de pico) e/ou quando o reservatório possuir uma parte pré-determinada de sua capacidade preenchida. Além disto, o intervalo de tempo e a intensidade da carga serão conhecidos previamente, de forma a facilitar muito a geração.

Ambos os casos podem ser pensados de forma análoga a uma usina hidroelétrica enquanto estiverem em regime permanente, mas, em ambos os casos há transitórios. Pode-se pensar que a cada ciclo de geração ocorrerá primeiro um transitório inicial (devido ao “golpe de ariete”), o sistema estabilizar-se-á (se houver tempo) e após, com o final da carga, haverá outro transitório em que o sistema parará. O primeiro transitório é, nitidamente, o ponto mais crítico mecanicamente.

Em ambos os casos haverá o “golpe de ariete”, que é impacto inicial e brusco da massa de esgoto e que pode causar danos nas turbinas. No primeiro caso, este problema ocorrerá com muita frequência, de modo que, ou a carga hidráulica não terá vazão para girar a turbina, apenas escoando pelas pás da mesma (uma torneira pingando geraria uma carga hidráulica assim, por exemplo) ou causará um impacto inicial forte e girará por um curto período de tempo. No caso com reservatório, o golpe ocorrerá sempre que o conteúdo do reservatório for liberado. Visando diminuir esse golpe, ao invés da válvula que libera o líquido que se encontra no reservatório, a mesma pode ser colocada perto da turbina caso a tubulação não seja muito larga, o que não afetaria muito a altura da coluna de água e aumentaria a vida útil das pás da turbina.

Em casos bem dimensionados, este golpe pode ocorrer uma vez por dia, por exemplo, facilitando inclusive a manutenção preventiva da máquina, que poderá ocorrer sem perda de carga hidráulica, e será mais previsível, visto que com o tempo será possível estimar o número de golpes até ser necessário qualquer reparo.

Por medidas econômicas, pode ser interessante utilizar uma turbina para um conjunto de N andares. É importante observar que a turbina e o gerador possuem curvas de eficiência de acordo com a carga, de forma que, em prédios altos não é aconselhável a utilização de um valor muito pequeno nesses conjuntos.

Pode ser bom para o sistema coordenar as saídas de esgoto de modo tal de forma a poupar o sistema. Caso uma turbina seja utilizada para um conjunto de andares, isto pode ser implementado liberando a carga do andar mais alto e, quando o esgoto atingir a altura do andar logo abaixo, liberar a carga do andar subsequente.

2.5.3 Carga relativa à chuva

A água da chuva coletada por um prédio depende exclusivamente de dois fatores: localização do prédio (em uma floresta tropical chove mais do que em um deserto, por exemplo) e a área do prédio (quanto maior a área do prédio, maior a área de coleta de água da chuva).

$$\text{Volume de água} = \text{Precipitação} \times \text{Área} \quad (4)$$

De acordo com Climate Charts (2013, texto digital), a média mensal de precipitação em Porto Alegre em 2012 foi de 112,18mm de chuva. Isso significa que um prédio hipotético, com um teto de 600m² de superfície, precisa escoar 67,308m³ de água, em média, por mês, ou 67308 litros. Considerando que, de acordo com Macintyre (2010), o consumo médio diário *per capita* em um apartamento seja de 200 litros, a chuva possui maior volume de água do que o consumo mensal de 11 pessoas. Considerando o fato desta água estar localizada acima do último andar, esse volume possui um potencial interessante para geração de energia elétrica. A geração pode ser realizada a fio d'água, entretanto, por motivos que serão apresentados mais adiante, mostra-se razoável que um reservatório seja construído quando possível.

2.6 EQUAÇÃO DA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

Supõem-se duas alturas (ou cotas), h_0 e h_1 , que significam a altura dos pontos “0” e “1”. A diferença ($h_0 - h_1$) é o desnível topográfico entre esses dois pontos. De acordo com Macintyre (2010), Bernouli demonstrou que quando um peso de líquido escoar num tempo “t” entre as seções S_0 e S_1 ele efetua trabalho, cedendo uma energia τ para vencer a resistência. Mas, mais importante do que isto, ele obteve a fórmula para a de energia de um líquido.

$$E = P \left(h + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \right) \quad (5)$$

Onde: E é a energia do líquido;

P é o peso do líquido;

h é a altura em que o líquido encontra-se (em relação a um referencial, como, por exemplo, a turbina);

p é a pressão no ponto;

γ é a densidade do líquido;

v é a velocidade do líquido;
 g é a gravidade.

A pressão pode ser reescrita como:

$$p = \gamma \cdot g \cdot H \quad (6)$$

Onde H é a altura da coluna de água.

Como é possível observar, a energia total de um líquido é a soma de três energias (que serão citadas na ordem em que foram apresentadas): energia potencial de posição, energia potencial de pressão (normalmente a energia e as perdas são tratadas como “metros de coluna de água”) e a energia cinética do líquido.

2.7 PERDA DE CARGA

Não é possível aproveitar toda a energia potencial gravitacional dos líquidos, visto que, primeiramente, parte desta energia perde-se no caminho. Esta perda de energia ocorre devido à perda de carga.

De acordo com Macintyre (2010), esta perda é resultante do atrito interno do líquido, da resistência oferecida pelas paredes em virtude da rugosidade e das alterações na trajetória das partículas do líquido impostas pelos dispositivos da tubulação. As perdas de carga podem ser normais (ao longo de um trecho) ou pontuais.

Há vários modos de realizar o cálculo das perdas de cargas normais. A perda de carga é proporcional ao comprimento e ao quadrado da velocidade e inversamente proporcional ao diâmetro da seção de escoamento. As fórmulas mais adequadas para cada situação dependem de fatores como o material da tubulação e o diâmetro da mesma (visto que são obtidas de forma empírica muitas vezes).

As perdas de cargas pontuais ocorrem ao longo de peças especiais da tubulação, como válvulas, joelhos e conexões. Estas perdas devem ser somadas com as perdas nominais. Os valores de cada perda dependem das peças utilizadas na tubulação. Novamente, são valores obtidos de forma empírica. Estas perdas também são proporcionais ao quadrado da velocidade.

2.8 ESCOLHA DA TURBINA

2.8.1 Turbinas hidráulicas

Turbinas hidráulicas são construídas especificamente para a geração de energia, de forma que são mais eficientes e atuam bem numa faixa maior de variação de fluxo. Entretanto, são mais caras e incomuns.

A escolha da turbina depende da altura da queda e da velocidade de rotação. A seleção do tipo de turbina mais adequado pode ser visto na tabela abaixo.

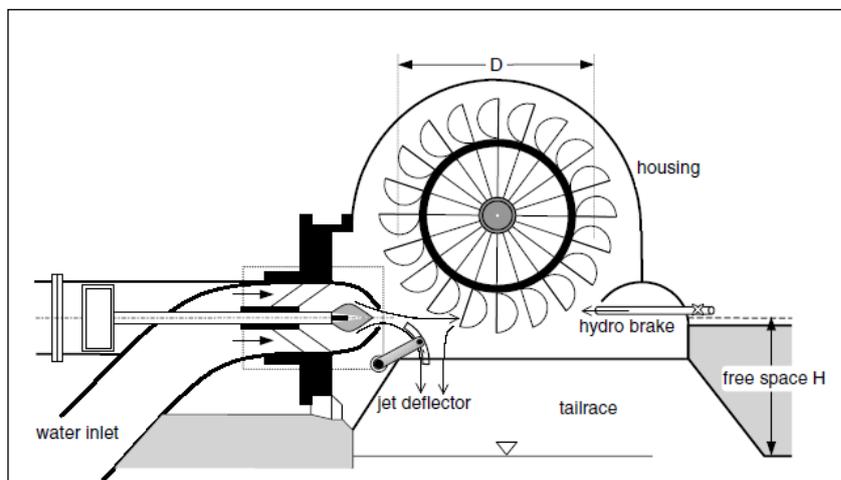
Tabela 1: Alturas de Queda e Velocidade de Rotação por Tipo de Turbina

Tipo de Turbina	Varição de Altura (m)	Varição de n_s
Pelton	400–2000	0–30
Francis	50–500	20–120
Mixed-flow	20–80	120–180
Kaplan (vertical)	8–50	180–260
Bulb pit or tube (horizontal)	0–10	260–360
Michel–Banki	1.50–150	30–210

Fonte: FARRET; SIMÕES, 2006, adaptado

Primeiramente, é necessário eliminar opções claramente inviáveis. Turbinas do tipo Pelton (figura 8) de acordo com Farret e Simões (2006) são adequadas para alturas entre 500m de queda até 2000m, fato extremamente improvável em um prédio.

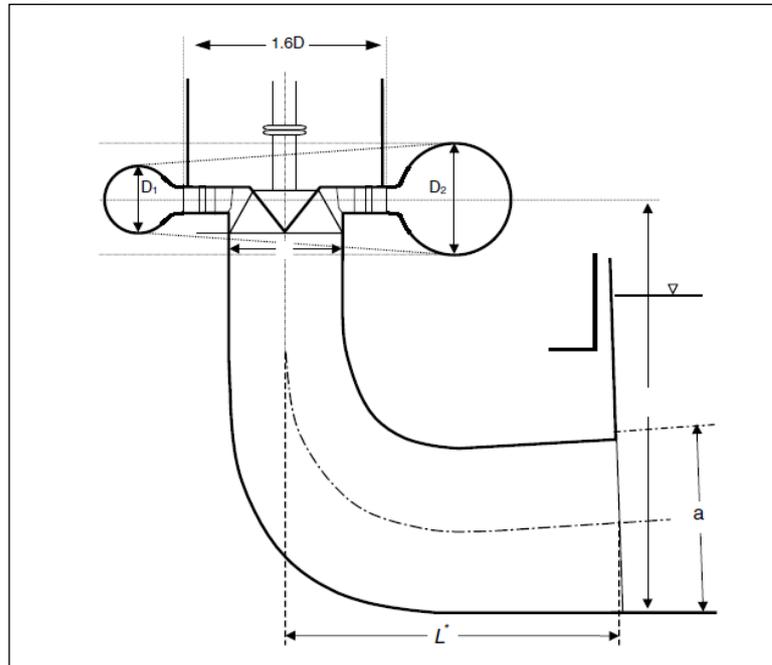
Figura 8: Turbina Pelton



Fonte: FARRET; SIMÕES, 2006.

Turbinas do tipo Francis (como se visualiza na figura 9), também devem ser eliminadas, visto que, de acordo com Farret (1999, p. 50), “O campo de aplicação da TF [...] é de 2 a 150 m de altura e desde 100 L/s”. Esta vazão é muito além da vazão do sistema proposto.

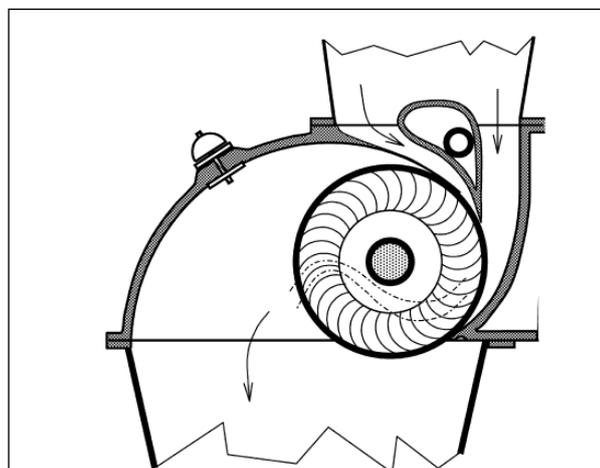
Figura 9: Turbina Francis



Fonte: FARRET; SIMÕES, 2006.

De acordo com Farret (1999), Turbinas Michel-Banki (TMB), como da figura 10, possuem vazão entre 25 a 700 litros por segundo e podem operar com desníveis de 1 a 200m, logo, podem ser consideradas como opções em casos com reservatório, mas, casos a fio d'água muito dificilmente conseguirão esta vazão.

Figura 10: TMB com entrada vertical

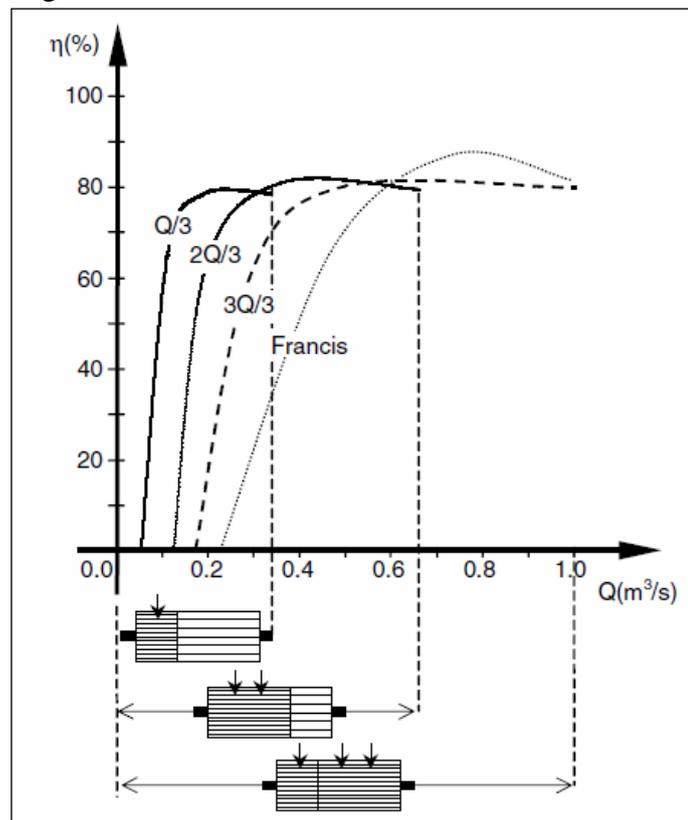


Fonte: FARRET; SIMÕES, 2006.

Sendo uma opção viável, é necessário entender um pouco melhor. Devido ao formato das curvas de eficiência como se verifica na figura 11, é possível utilizar a turbina com até 20% da sua capacidade de obter uma eficiência aceitável. Como comparação, na figura 11 constará também a curva da turbina Francis (que naturalmente possui vazão maior), e fica ainda mais evidente o motivo dela ter sido eliminada como opção. É interessante ressaltar que a TMB pode ter apenas algumas de suas células operadas, o que afeta na sua curva de eficiência.

Apesar de ser uma opção viável do ponto de vista de engenharia, financeiramente pode não ser vantajosa, visto que existem opções um pouco menos eficientes, entretanto de menor custo.

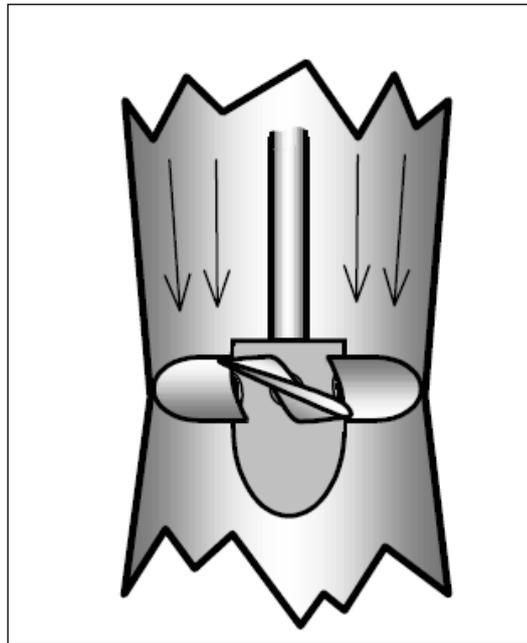
Figura 11: Eficiência da TMB e da Turbina Francis



Fonte: FARRET; SIMÕES, 2006.

De acordo com Farret (1999), turbinas do tipo Kaplan (ou Sifão), como na figura 12 são utilizadas para baixas quedas ou para fio d'água, com pequenas potências e grandes variações de vazão ao longo do ano, sendo recomendadas para quedas pequenas (entre 80cm e 5m).

Figura 12: Turbina Kaplan



Fonte: FARRET; SIMÕES, 2006.

Existem outros tipos de turbinas, mas estas são as mais populares. Apenas analisando as possibilidades de turbinas, já é possível concluir que não utilizar reservatórios não é uma boa opção. A única turbina que se mostra minimamente favorável à utilização a fio d'água (mas, mesmo assim, com um fluxo menos inconstante do que o de um esgoto predial) necessita de quedas muito baixas (como em uma residência, por exemplo), sendo esta possibilidade válida apenas em casos muito específicos.

Uma geração inconstante resultará em muitos transitórios elétricos, fazendo com que a utilização a fio d'água seja ruim em todos os aspectos além da simplicidade de construção e controle.

2.8.2 Bombas de água como turbinas

Segundo Farret (1999, p. 46): “O uso inverso de bombas de água como turbinas para microcentrais hidroelétricas tem ganho bastante popularidade por poder proporcionar uma agradável redução nos custos das instalações”. Estas bombas normalmente são utilizadas em indústrias para recuperar energia que seria perdida, tornando-as ideais para a aplicação proposta, principalmente na recuperação da energia perdida com o direcionamento da vazão de água do ramal público para o reservatório inferior.

Para que uma bomba opere como turbina, é necessário que se inverta o sentido “normal” em que o líquido flui. De acordo com Medeiros (2004), para que o rendimento de uma bomba operando como turbina seja igual aquele operando como bomba, é necessário que a altura e a vazão sejam maiores para a mesma rotação. Entretanto, de acordo com Farret (1999), apesar de possuírem rendimento menor e serem sensíveis a faixa de operação, costumam menos (por serem produzidas em massa) e tem tempo de aquisição rápido, com ampla variedade de padrões comerciais, o que as torna ainda mais interessantes para a aplicação.

Quando há muita variação no fluxo de água, este esquema torna-se muito complexo, de forma tal que, para casos a fio d'água, este esquema é contra indicado. Ao mesmo tempo, para reservatórios este esquema torna-se simples e conveniente. Colocando uma bomba por andar (ou um conjunto de andares cuja altura seja similar), é possível restringir cada bomba a sua faixa mais adequada.

2.9 POSICIONAMENTO DOS GERADORES

Após o estudo acima, conclui-se facilmente que um ponto muito interessante para a colocação de um gerador é entre a rede pública de distribuição e o reservatório inferior (quando existe), visto que a água chega com pressão considerável e a energia seria naturalmente dissipada. Outros geradores devem ser colocados no térreo ou subsolo, um pouco antes da conexão do esgoto predial com o esgoto público, de forma a maximizar a altura da queda d'água.

3 ESTUDO ELÉTRICO

3.1 ESCOLHA DO TIPO DE GERADOR

Para a opção do tipo de gerador mais adequado ser justificável, é necessário um estudo sobre no mínimo os principais tipos, de forma tal que a escolha seja pensada de forma comparativa, pensando-se nos pontos positivos e negativos de cada gerador. Inicialmente, é interessante dividir este problema em casos genéricos, e, na medida em que cada caso for estudado, o mesmo pode ser dividido de forma mais específica. A primeira divisão entre os tipos de geradores, seguindo esta lógica, deve ser a mais básica de todas: CA (corrente alternada) ou CC (corrente contínua).

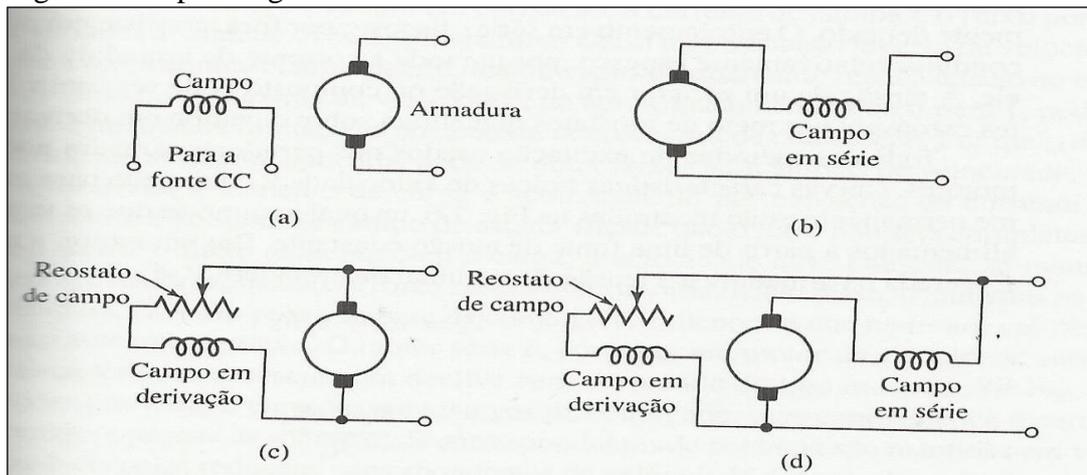
3.1.1 Geradores CC

Geradores CC são facilmente controláveis e flexíveis, mas as escovas são um problema grave e, desconsiderando a eletrônica, as aplicações mais utilizadas hoje em dia, costumam ser em corrente alternada, o que exigiria que alguma aplicação fosse adaptada (iluminação) ou que eletrônica de potência fosse utilizada para a conversão da energia, o que significaria dissipação de energia.

Geradores CC, entretanto, possuem problemas de natureza própria, como o faiscamento e o desgaste das escovas, que aumentam a necessidade de manutenção. Além disto, são maiores e menos eficientes. Entretanto, apesar de serem problemas graves, é necessário entendê-los um pouco melhor antes do descarte da ideia.

Há diferentes maneiras de utilizar um gerador CC: com excitação em série (caso “b” na figura 13), em derivação (caso “c” na figura 13), composta (caso “d” na figura 13) ou independente (caso “a” na figura 13), sendo cada uma delas um caso diferente. Além disso, é possível substituir a excitação de campo por ímãs.

Figura 13: Tipos de geradores CC



Fonte: FITZGERALD, 2006.

3.1.1.1 Excitação independente

Neste caso, produz-se o fluxo de campo conectando-se o circuito de campo em um circuito independente do indutivo do gerador. Neste tipo de gerador, a tensão nos terminais é diretamente proporcional à velocidade de rotação do rotor e da corrente de campo, de forma tal que variações na corrente de campo podem compensar variações na velocidade de rotação.

É necessário observar que a corrente de campo é um gasto energético, de modo que esta opção só pode ser considerada em casos com reservatório, em que a corrente de campo pode ser ligada apenas para os momentos em que há vazão. Em comparação com as outras opções que podem ser utilizadas com reservatório, devido a algo gasto com manutenção e menor eficiência, esta opção normalmente não é a melhor.

3.1.1.2 Excitação série

Neste caso, produz-se o fluxo de campo conectando-se o circuito de campo em série com o indutivo do gerador. Esta opção é de implementação extremamente simples, entretanto, a tensão varia amplamente, de acordo com a carga, e há o risco do gerador desmagnetizar-se, problema grave que deve ser combatido. Devido a estes fatos, esta opção não deve ser considerada.

3.1.1.3 Excitação em derivação

Neste caso, produz-se o fluxo de campo conectando-se o circuito de campo diretamente nos terminais do gerador, protegidos apenas por um reostato de campo. Assim como no caso da excitação independente, é possível controlar a tensão de duas formas, sendo que alterações em uma delas podem ser compensadas pela outra.

A tensão depende da rotação do gerador e da corrente de campo, logo, alterações na rotação podem ser compensadas alterando a excitação utilizando o reostato. Uma vantagem deste modo de excitação, em comparação com a independente, é o fato de não ser necessária nenhuma forma externa de excitação.

Com isso, esta opção deve ser considerada caso seja utilizado a geração a fio d'água, visto que seria possível controlar a tensão gerada mesmo com as mudanças na carga mecânica e não seria necessário uma fonte para excitar o gerador.

3.1.1.4 Excitação composta

Nesse caso, produz-se o fluxo de campo conectando-se o circuito de campo em parte em série e em parte em derivação. Pode ser aditivo (ambos os campos somam-se) ou diferencial (os campos subtraem-se). Possui a vantagem de ter valores de tensão mais uniformes do que o caso em derivação caso a implementação seja bem feita.

Com isto, esta opção poderia ser utilizada para a geração a fio d'água, visto que possui propriedades muito similares à geração em derivação, mas pode fornecer uma tensão ainda mais estável.

3.1.1.5 Excitação por imãs

Nesse caso, o fluxo de campo é gerado por um imã, podendo ser considerado constante. É semelhante ao caso de excitação independente, com a ressalva de que o valor do campo é considerado constante.

Não apresenta gastos com a corrente de campo, mas o mesmo não pode ser alterado como forma de controle da tensão, por exemplo, o que torna necessária a existência de um controle de velocidade.

Entre as opções CC, esta é a melhor opção para casos como a entrada de água para o reservatório superior, em que a pressão e vazão são similares sempre que isto ocorre, mas o momento em que a entrada de água ocorre varia muito com o tempo.

3.1.2 Geradores CA

A energia elétrica em CA é a energia mais comum para distribuição domiciliar. Há dois grandes grupos de geradores CA: geradores síncronos e de indução. Ambos os grupos possuem vantagens e desvantagens, que devem ser estudadas para a obtenção de uma melhor escolha.

3.1.2.1 Geradores de indução

O gerador de indução não necessita nenhum tipo de corrente de campo, o que naturalmente o torna uma opção a ser considerada para esta aplicação. Este tipo de gerador não necessita de regulação precisa e é extremamente simples.

De acordo com Chapman (2005), possui severas limitações, como não poder gerar potência reativa, e mais, consumir potência reativa, devendo ser conectado a uma fonte externa para obtê-la. Esta mesma fonte externa deve controlar a tensão no gerador.

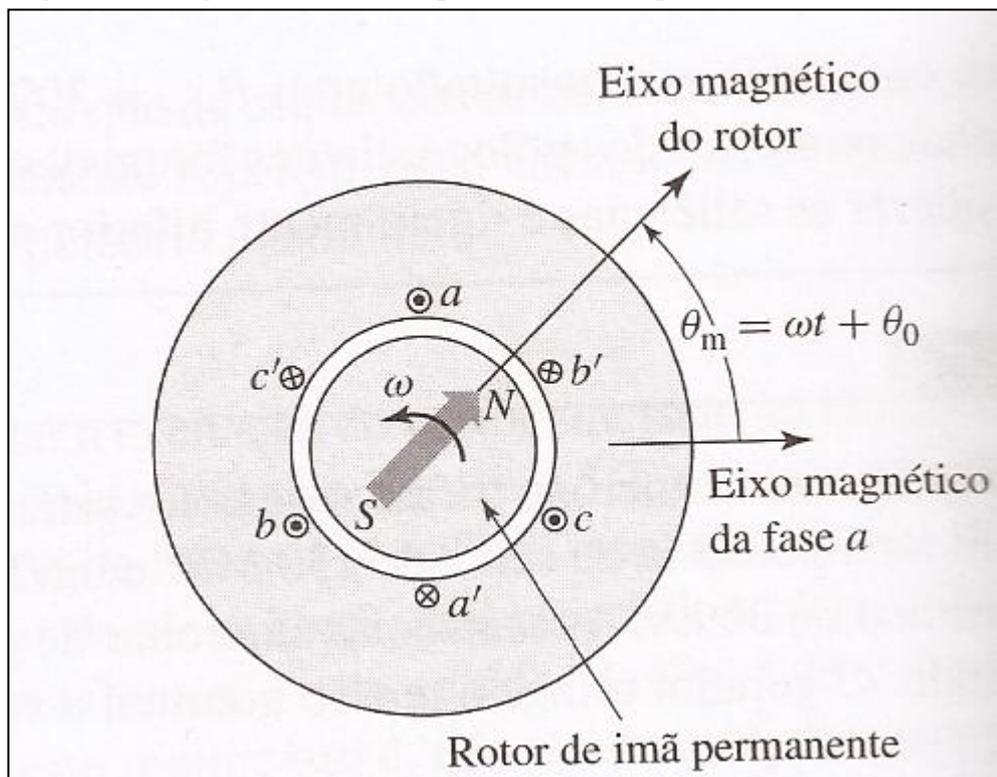
Entretanto, de acordo com Farret e Simões (2006), é muito fácil operá-las em paralelo com grandes sistemas de potência, que forneceriam a potência reativa e controlariam a tensão gerada. Além disso, este tipo de gerador é muito utilizado em pequenas hidroelétricas. Outra forma de operá-las e compensar o problema da não produção de reativos seria conectá-las a bancos de capacitores ou a um inversor.

Outro ponto importante é que se a potência gerada for muito pequena ocorrerá uma motorização em caso de conexão com a rede pública, de forma que, ao invés a máquina operar como gerador funcionará como motor. Além disso, este tipo de gerador claramente possui problemas relativos à possibilidade de desmagnetização em caso de operação isolado da rede e frequência, ainda mais se for considerado o tipo de carga mecânica que o mesmo estará sujeito. Logo, mesmo este tipo de gerador sendo muito utilizado em pequenas centrais hidroelétricas e eólicas, não é o mais adequado para a utilização em prédios. Em PCHs, por exemplo, há pessoas responsáveis por verificar a todo o momento se o sistema está funcionando adequadamente, enquanto em um prédio isto pode demorar muito tempo. Além disto, o controle precisaria ser perfeito para o sistema funcionar.

3.1.2.2 Geradores síncronos

Geradores síncronos conforme a figura 14, ao contrário dos geradores de indução, necessitam de algum tipo de excitação exclusiva no rotor. Considerando a carga como estocástica (caso a fio d'água), isto é visivelmente um problema, visto que a corrente de campo é um gasto de energia que, por muitas vezes, será desnecessário (afinal, não há certeza do momento em que a carga será gerada).

Figura 14: Diagrama de uma máquina CA de imã permanente



Fonte: FITZGERALD, 2006.

Caso seja utilizado um reservatório que controle os momentos que a carga hidráulica chega ao gerador, é possível planejar um método de controle para que a corrente de campo excite o rotor apenas nos momentos desejados. Caso não seja possível realizar um controle do momento em que a carga hidráulica chega ao gerador, a solução mais apropriada, pensando apenas no quesito eficiência, é a adoção de geradores síncronos com ímãs permanentes.

A frequência de geração de energia da máquina síncrona depende exclusivamente da frequência de rotação da mesma e do número de pólos, como pode ser visto na equação (7), logo este é um fator que pode ser controlado.

$$f_c = \frac{n_m P}{120} \quad (7)$$

Onde: f_c é a frequência elétrica (em Hz);

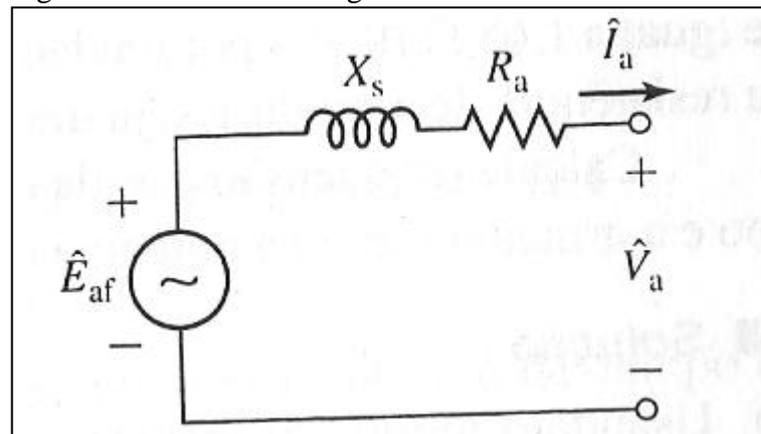
n_m é a rotação mecânica (em RPM);

P é o número de pólos.

Caso a rotação que é possível de ser gerada seja muito baixa, é possível aumentar o número de pólos. Entretanto, é necessário assegurar que a frequência de rotação da mesma seja sempre a mesma, caso contrário, cada momento gerará energia numa frequência diferente, de forma tal que a mesma não seria útil sem retificação (o que significa perdas consideráveis). Caso não seja possível alterar o número de pólos ou chegar à velocidade síncrona, é necessário um inversor para corrigir a frequência.

Após estas observações, é razoável a tentativa de entender melhor o modelo do gerador (como é demonstrado na (Figura 15) para compreender melhor o seu funcionamento.

Figura 15: Modelo de um gerador síncrono



Fonte: FITZGERALD, 2006.

A tensão gerada também depende da frequência em que o mesmo opera, como pode ser visto na equação (8), o que torna ainda mais necessário alguma forma de controle de velocidade de rotação.

$$E_{af} = K\Phi\omega \quad (8)$$

Onde: E_{af} é a tensão de Thevenin (isto é, a tensão desconsiderando a resistência interna) gerada;

K é uma constante que representa a construção da máquina;

Φ é o fluxo magnético da máquina;

ω é a velocidade de rotação da máquina em radianos por segundo.

É importante ressaltar que o valor da tensão entre os terminais do gerador é calculado como:

$$V_a = E_{af} - I_a(jX_s + R_a) \quad (9)$$

Onde: V_a é a tensão entre os terminais do gerador;

I_a é a corrente que o mesmo gera;

R_a é a resistência de armadura;

X_s é a indutância da bobina do gerador.

É válido observar que a tensão entre os terminais do gerador depende da corrente, que, por sua vez, é consequência da carga. O gerador fornece potência elétrica, logo, quanto maior a carga, menor a tensão que o mesmo é capaz de manter.

A afirmação acima possui algumas consequências. A principal delas é que o destino desta potência gerada precisa ser pensado com certa antecedência, de forma ao sistema ser adequado de forma tal que a tensão gerada seja aproximadamente constante em todos os casos e que a potência seja utilizada da melhor maneira possível.

Considerando que a carga pode ter variações na intensidade do escoamento do líquido, este problema torna-se ainda mais grave. Todos os parâmetros são afetados por este fator!

Apesar de todos estes problemas, o gerador síncrono possui características conhecidas e de controle relativamente fácil. Além disso, é fácil conectá-los em paralelo, basta que para isto possuam mesma tensão, ângulo entre fases e sequência de fases, além de frequências muito similares (recomenda-se que o novo gerador a ser conectado tenha frequência levemente maior, que depois sincronizará com a rede). Outro fator positivo quanto a este tipo de gerador é sua capacidade de agüentar sobrecargas em curtos períodos de tempo, fato que pode ocorrer nesta aplicação. Com isto, o gerador síncrono aparentemente é uma boa opção, caso seja possível controlar um pouco a carga hidráulica.

3.2 TRANSITÓRIOS E QUALIDADE DA ENERGIA GERADA

Este tipo de geração claramente terá muitos transitórios, problemas com frequência, geração inconstante, enfim, a energia elétrica poderá ter qualidade ruim, logo, este tópico precisa ser bem pensado. Cada vez que o sistema gerar ou deixar de gerar energia ocorrerá um transitório, de forma tal que o gerador será instável.

Em geradores CC ocorrerá um pico de corrente que pode causar danos cada vez que o sistema for ativado, entretanto, caso esta energia seja armazenada, pode ser útil. Em casos CA é mais complicado aproveitar a energia deste período transitório (até equacionar como o gerador funciona durante este período é complicado), necessitando-se de bons inversores.

No caso de cargas a fio d'água, nenhum gerador CA mostra-se apropriado, visto que a qualidade da energia será muito ruim, devendo a mesma sempre passar por inversores. Desta forma, devido a todos os problemas com perda de energia e qualidade muito ruim, é bastante razoável optar por geradores CCs, apesar de serem mais caros, espaçosos e exigirem mais manutenção.

Uma sugestão razoável para geradores CA é utilizar geradores de menor potência, de forma tal que naturalmente terão menor vazão, pois com isto perde-se menos energia durante os transitórios e intervalo de sincronização e devido ao fato deles serem mais baratos. Após o mesmo estar sincronizado com a rede, caso utilize-se reservatórios, a tendência é o gerador não sofrer alterações até o final da carga mecânica.

3.3 DESTINO DA ENERGIA GERADA

Além de gerar a energia, é importante pensar para onde ela será enviada. As opções possíveis são o consumo imediato da energia no próprio prédio, o armazenamento em baterias para consumo posterior em qualquer aplicação (como a venda desta energia) ou a injeção desta energia para a rede.

Na opção de consumo imediato para o prédio, é necessário garantir que a energia tenha qualidade suficiente para isto, operação realizada com inversores. Além disso, é necessário garantir que no momento tenha a necessidade de carga e coordenar este fato com a diminuição de utilização da carga da rede elétrica. Visivelmente esta opção é bastante complexa, mas plausível, caso haja um controle bem feito. Entretanto, é necessário utilizá-la sempre em horários de pico de demanda de energia e, caso seja gerada mais energia do que a consumida pelo prédio é necessário que haja um sistema de proteção e, se possível, um sistema de armazenamento para utilização posterior. Este sistema de armazenamento pode converter a energia elétrica excedente de CA para CC para o armazenamento, mas isto significa perdas energéticas.

Na opção de armazenamento em baterias, é necessário conectar o gerador a uma ou algumas baterias, que podem ser utilizadas para as mais diversas aplicações. É necessário, entretanto, que caso a energia seja gerada em CA a mesma seja convertida para CC, o que

significa perdas. Este sistema é claramente o menos complexo, visto que não necessita de sincronização com nenhum outro sistema e a carga sempre será conhecida. Esta energia poderia ser consumida internamente ou vendida posteriormente.

A opção da injeção de energia na rede depende de fatores como a legislação vigente. Como visto acima, esta opção torna-se interessante para o uso com geradores de indução, mas, visto que o tempo de geração por dia é curto, o tempo necessário para sincronizar os geradores com a rede pode ser fatal. Além disto, é necessário utilizar transformadores para igualar os valores de tensão. Esta opção exige maior investimento inicial, visto que é necessário condicionar a energia de forma a garantir a compatibilidade do sistema e de sistemas de proteção, e ambos os sistemas exigem um bom investimento inicial.

É interessante observar que a sincronização de geradores de indução na rede é mais simples do que a de geradores síncronos. Visto que, para outras aplicações o gerador de indução mostra-se não muito bom, um sistema que pretende destinar a energia para a rede pode ser projetado com este tipo de gerador, mas isto pode comprometer as outras opções de uso desta tecnologia.

A interconexão com a rede também precisa atentar para certos padrões. De acordo com Farret e Simões (2006), tecnologias com capacidade de 10MVA ou menos devem atentar para o padrão IEEE 1547 – *Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems* (Padronização para Interconectar Recursos Distribuídos com o Sistema de Potência Elétrico) [tradução livre], que dá especificações técnicas para a interconexão e para testes, cobrindo requerimentos gerais, resposta para condições anormais, qualidade da energia, segurança, entre outros tópicos.

Para realizar a interconexão com a rede é necessário um bom controle de tensão, integração com a terra, sincronização, um bom isolamento e boas respostas em caso de distúrbios de tensão ou frequência. Outros pontos relevantes são relativos à desconexão, em caso de faltas elétricas e cuidado com harmônicas.

Caso esta opção, a opção de injeção de energia na rede seja escolhida, é interessante que a transferência de potência para a rede ocorra em horários nos quais a concessionária paga mais pela energia, se houver tarifação diferenciada por horário.

Logo, entre todas as opções, é interessante almejar a conexão com a rede pública, mas, isto só deve ser feito quando a tecnologia estiver bem consolidada, visto que uma falha de controle causaria grandes danos. Enquanto isto não for possível, é mais interessante optar por armazenar a energia em baterias que poderiam ser utilizadas para diversas aplicações, inclusive

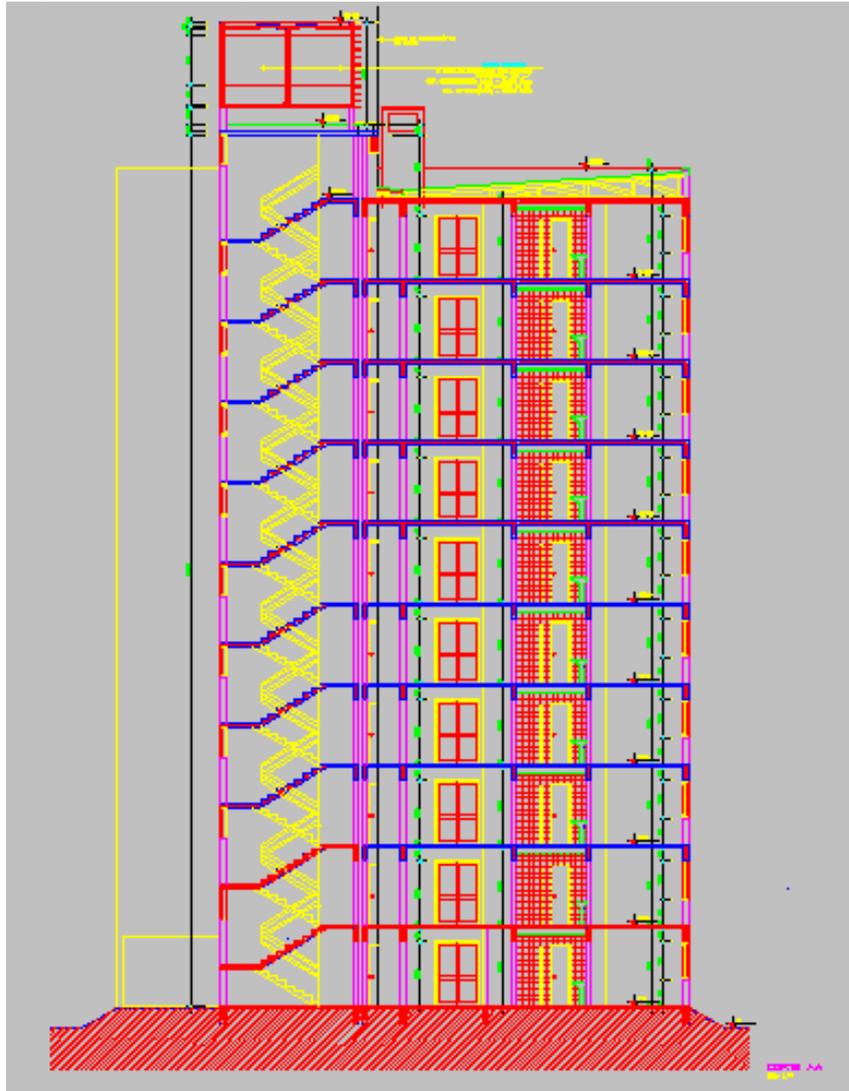
ser conectadas com a rede pública, após serem totalmente carregadas (fato que provavelmente não ocorrerá em apenas um dia) ou consumi-la imediatamente no próprio prédio.

4 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso deve obter uma estimativa de quanta energia elétrica é possível obter em um caso aproximado com a realidade. Como foi possível observar durante o trabalho, há 3 situações favoráveis para a geração de energia elétrica: o aproveitamento da pressão normal da rede hidráulica pública (em casos em que o prédio possui reservatório inferior), o aproveitamento da água da chuva e o aproveitamento dos esgotos.

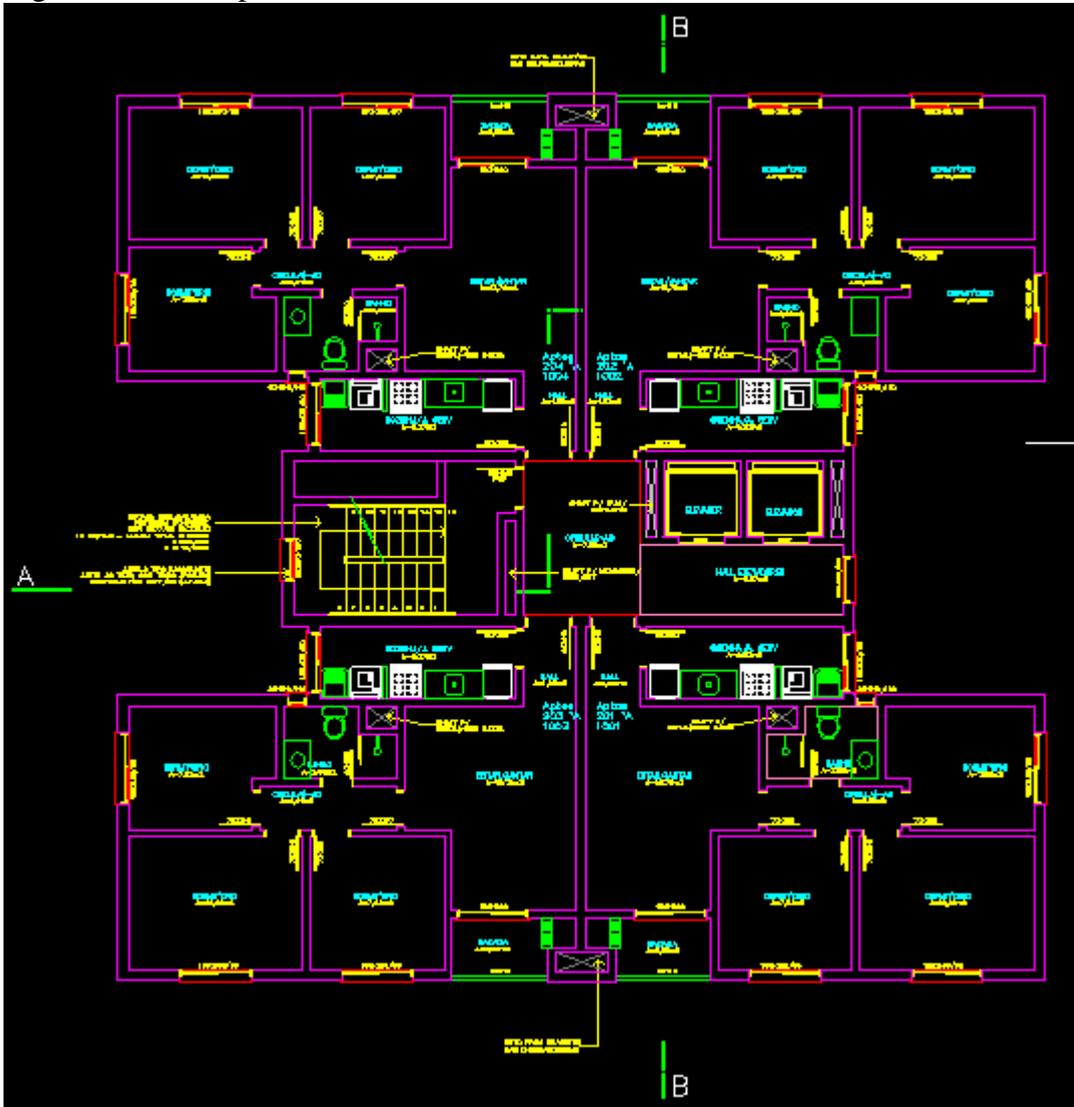
O método para cálculo é bastante similar para qualquer planta, entretanto os valores das variáveis alteram-se caso a caso. Nesse caso, será utilizado o prédio de 10 pavimentos, conforme mostra a figura a seguir.

Figura 16: Prédio para Estudo de Caso - Corte



Este prédio possui 10 pavimentos e cada pavimento possui 2,68 metros de altura. Na figura 17, é possível observar que cada andar possui 4 apartamentos com 3 quartos cada.

Figura 17: Prédio para Estudo de Caso - Pavimento



Para realizar o estudo de caso é necessário realizar algumas suposições que não são necessariamente coerentes com a realidade, mas são aproximações necessárias:

- a) o consumo médio de água por andar é o mesmo em todos os andares;
- b) o número médio de utilizações do banheiro por andar é o mesmo em todos os andares.

Visto que, cada andar possui 12 dormitórios, é razoável supor que em cada andar morem em torno de 18 pessoas (realizando uma estimativa de 4,5 usuários médios por apartamento, ou 1,5 habitantes por dormitório). Outra suposição é que este prédio respeite a

média de 200 litros/habitante, que é considerada uma boa estimativa de gasto de água por pessoa. Além disto, estima-se que cada usuário utiliza o banheiro em média, três vezes por dia, totalizando assim um gasto de aproximadamente 30 litros de água por este meio.

Com isto, o volume de água consumido diariamente é, em média:

$$V = U \cdot C \quad (10)$$

Onde: V é o volume de água consumido;

U é o número de usuários;

C é o consumo médio por usuário.

Resultando em 3600 litros (ou 3,6 m³) de água por dia por andar ou 36 mil litros (ou 36 m³) de água por dia para o prédio.

4.1 APROVEITAMENTO DA PRESSÃO NORMAL DA REDE HIDRÁULICA PÚBLICA

Como foi visto durante o projeto em Porto Alegre, a concessionária necessita entregar a água com uma pressão entre 10 metros de coluna de água e 40 metros de coluna de água. Em casos em que a edificação possui reservatório inferior e superior, toda esta energia é simplesmente perdida, logo, é bastante razoável reaproveitá-la. Para turbinas modernas, de acordo com Farret (1999), a potência gerada pode ser calculada por:

$$P_t = \eta \rho g Q H_m \quad (11)$$

Onde: P_t é a energia potencial (em Watts);

η é a eficiência da turbina;

ρ é a densidade da água (em kg/m³);

g é a gravidade (em m/s²);

Q é o fluxo da água (em m³/s);

H_m é a altura da coluna de água equivalente (em N/m²).

Como é facilmente observável, a energia gerada depende da pressão média (que depende do local), que é o fator H_m na equação acima. Como se deseja obter a energia gerada por um determinado período de tempo, ao invés de fluxo, deve-se considerar a quantidade total do líquido envolvida. Com isto, a energia gerada pode ser calculada por:

$$E_t = \eta \rho g V H_m \quad (12)$$

Onde: E_t é a energia potencial (em Joules);

V é o volume de água consumido no momento.

A gravidade e a densidade de água são constantes. Por fins de simplicidade, a gravidade será considerada como 9,8 m/s² e a densidade da água será considerada como 1000

kg/m³ (mesmo sabendo que este valor não corresponde exatamente à realidade devido às impurezas do esgoto). A pressão média para este exemplo será de 20 metros de coluna de água (um valor entre o valor mínimo e o intermediário). O rendimento do gerador será aproximado, como 60% (uma estimativa conservadora), devido também a fatos como perdas em transitórios e conversões de energia. Com isto, é possível concluir que a energia gerada por dia apenas aproveitando a potência da rede equivale a:

$$E_t = 0,6.1000.9,8.36.20 \quad (13)$$

$$E_t = 4233600 \text{ J/dia} \quad (14)$$

Ou, convertendo a energia de Joule para kWh:

$$E_t[kWh] = \frac{E_t[kWh]}{1000.3600} \quad (15)$$

$$E_t[kWh] = 1,176 \text{ kWh/dia} \quad (16)$$

O que resulta em aproximadamente

$$E_t[kWh] = 35,28 \text{ kWh/mês} \quad (17)$$

Este aproveitamento, devido a variação de pressão e incerteza no tempo a cada geração é melhor realizado com um gerador com ímãs permanentes

4.2 APROVEITAMENTO DA ÁGUA DA CHUVA

Novamente, é possível utilizar a equação (12).

$$E_t = \eta \rho g V H_m \quad (12)$$

Como visto anteriormente no projeto, pela equação 4 concluímos que:

$$\text{Volume de água} = \text{Precipitação} \times \text{Área} \quad (4)$$

Sabendo que a média mensal de Porto Alegre foi de 112,18mm em 2012 e que a área deste exemplo é de 320 m², o volume chuva mensal captado pelo prédio é de

$$\text{Volume de água} = 0,11218 \times 320 \quad (18)$$

O que resulta em aproximadamente 35,8 m³ de água ou 35800 L de água por mês.

A carga da chuva pode ser obtida a fio d'água ou utilizando-se um reservatório. Caso seja utilizada a fio d'água, o valor H_m deve ser calculado. Nesse caso, este valor não corresponde à altura da queda de água da chuva do reservatório até o gerador, mas sim, o valor convertido de coluna de água da altura, que deve ser calculado a partir da equação de Bernoulli. Além disso, há perda de carga, que pode ser calculada para aproximações mais precisas. Neste caso, as perdas de carga serão ignoradas (o que não acarretará em muitos prejuízos devido a algumas estimativas conservadoras).

Utilizando-se a equação 5:

$$E = P \left(h + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \right) \quad (5)$$

Realizando um equivalente entre energia potencial gravitacional e energia de pressão, é possível concluir que uma altura h equivale:

$$h = \frac{p}{\gamma} \quad (19)$$

Utilizando-se a equação 6:

$$p = \gamma \cdot g \cdot H \quad (6)$$

E isolando o termo importante que interessa descobrir (o equivalente em metros de coluna de água):

$$H = \frac{h}{g} \quad (20)$$

Nesse caso, a altura da queda é a diferença de altura entre a base do reservatório (ou tubulação que canaliza a chuva a partir do telhado) até o gerador. O reservatório da chuva, para um prédio de 10 pavimentos e 2,68 metros por pavimento (considerando a espessura da laje), será arredondado para 27 metros. Para um cálculo mais preciso, é necessário estimar a perda de carga.

Com isso, a altura de coluna de água equivalente é de aproximadamente 2,75 metros. Aplicando este valor em (13) e considerando o rendimento do gerador como 60%, obtém-se:

$$E_t = 0,6 \cdot 1000 \cdot 35,8,27 \quad (21)$$

$$E_t = 579960 \text{ J}/\text{dia} \quad (22)$$

Ou, convertendo a energia de Joule para kWh utilizando (15):

$$E_t[\text{kWh}] = \frac{E_t[\text{J}]}{1000 \cdot 3600} \quad (15)$$

$$E_t[\text{kWh}] = 0,1611 \text{ kWh}/\text{mês} \quad (23)$$

Entretanto, caso seja utilizado um reservatório, é possível armazenar a água da chuva até que seja possível haver uma coluna de água durante a maior parte da geração. Na parte inicial da geração, a altura da coluna de água será superior a altura inferior do reservatório, enquanto no final da geração, por motivos óbvios, a pressão diminuirá. Utilizando-se canos de 100mm, aproximadamente 0,22m³ de água (ou 22L) preencherão a tubulação, de forma que, sempre que ocorrer geração, todo o resto do volume de água chegará a turbina com uma pressão de 27 metros de coluna de água ou superior. Assim, há mais um motivo para a utilização de reservatórios.

Novamente, aplicando-se (12) com uma eficiência do gerador de 60%, mas agora com o caso atual:

$$E_t = 0,6.1000.9,8.35,8.27 \quad (24)$$

$$E_t = 5683608 \text{ J/mês} \quad (25)$$

Ou, convertendo a energia de Joule para kWh utilizando (15):

$$E_t[\text{kWh}] = \frac{E_t[\text{J}]}{1000.3600} \quad (15)$$

$$E_t[\text{kWh}] = 1,57878 \text{ kWh/mês} \quad (26)$$

Utilizando-se reservatórios que liberam água em intervalos de tempo conhecidos do sistema, é recomendável a utilização de um gerador CA síncrono.

4.3 APROVEITAMENTO DO ESGOTO

Novamente, é possível utilizar a equação (12).

$$E_t = \eta \rho g V H_m \quad (12)$$

Os cálculos realizados neste item são similares aos do item 4.2. Como mostrado no item anterior, a geração com reservatório é mais eficiente, logo, apenas ela será calculada, mas com algumas observações:

- 1 - É necessário perder um andar para o armazenamento do esgoto;
- 2 - É razoável considerar que o esgoto armazenado no pavimento N comece sua queda em N-1;
- 3 - Este prédio não possui subsolo (o que alteraria o número de andares de queda).

Com isto, a altura da queda de água de um andar é igual à altura por andar multiplicada pelo andar original do esgoto menos 2. Como implicação disto, o térreo e o segundo pavimento não serão considerados devido ao fato de que em ambos os casos a queda seria desprezível.

Devido às estimativas assumidas no início do capítulo, é sabido que cada andar consome 3,6m³ de água por dia. Como o prédio possui 10 pavimentos, 8 reservatórios existirão no máximo, e, com isto, 8 quedas. Utilizando-se (20) em (12) e já estruturando para o somatório da energia de todos os andares, obtém-se:

$$E_t = \sum_{n=1}^N n \cdot g \cdot h_a \cdot \eta \rho V_{n+2} \quad (27)$$

Onde: E_t é a energia convertida (em Watts);

η é a eficiência da turbina;

ρ é a densidade da água (em kg/m³);

V_{n+2} é o volume de água consumido n-simo + 2 andar descontado consumo do vaso sanitário;

n é a variável do somatório;

N é o número máximo de andares que contam para o somatório;

h_a é a altura por andar.

Claramente, o somatório é uma progressão aritmética de n com razão $r=1$, logo, se o rendimento do gerador e turbina (ou geradores e turbinas) for o mesmo e o consumo de água for o mesmo em todos os andares, é possível reescrever a equação como:

$$E_t = \frac{N(N+1)}{2} \cdot g \cdot h_a \cdot \eta \rho V_{n+2} \quad (28)$$

Substituindo os valores:

$$E_t = \frac{8.9}{2} \cdot 9,8.2,68.0,6.1000. (3,6.0,85) \quad (29)$$

$$E_t = 1735945,344 \text{ J/dia} \quad (30)$$

Ou, convertendo a energia de Joule para kWh:

$$E_t[kWh] = \frac{E_t[kWh]}{1000.3600} \quad (15)$$

$$E_t[kWh] = 0,4822 \text{ kWh/dia} \quad (31)$$

O que resulta em aproximadamente

$$E_t[kWh] = 14,466 \text{ kWh/mês} \quad (32)$$

4.4 SOMATÓRIO DOS APROVEITAMENTOS

Utilizando-se os valores de (17), (26) e (31), é possível concluir que este prédio possui o potencial de, em média, gerar:

$$E_t[kWh] = 51,32478 \text{ kWh/mês} \quad (33)$$

Apesar desta estimativa não ter considerado nenhuma perda de carga, ela considerou o rendimento do conjunto turbina X gerador como 60%, de forma a dar uma ordem de grandeza compatível com a realidade.

Essa energia equivale a aproximadamente a metade do gasto energético de um apartamento. É interessante observar que aproximadamente 69% dessa energia é gerada na entrada de água da rede pública, água que depende basicamente do número de habitantes do

condomínio e do consumo médio destes, sendo esta uma ideia extremamente simples e de fácil implementação, até em prédios antigos. O aproveitamento do esgoto resulta em aproximadamente 28%, mas possui implementação muito mais complexa e de pequeno valor para implementar em um prédio já construído. O aproveitamento da água da chuva resulta em aproximadamente 3% da geração, mas devido a fácil implementação e da geração independentemente do consumo de água do prédio, pode ser uma alternativa viável (outras aplicações da água da chuva, entretanto, podem ser mais vantajosas, como o aproveitamento da mesma para uso em vasos sanitários).

5 VIABILIDADE ECONÔMICA

A viabilidade econômica de cada projeto deve ser avaliada de forma individual. Entretanto, o método a ser utilizado para isto pode ser padronizado. Neste caso, será feita uma pequena análise de fatores que podem servir como parâmetro para indicar quais ideias possuem maior ou menor potencial.

É possível realizar esta análise de viabilidade de várias maneiras e considerando vários fatores, como inflação, juros, variação no preço da energia elétrica, etc., de forma, tornar a análise mais completa e precisa, mas mais complexa e demorada. De qualquer forma, alguns princípios básicos sempre serão seguidos. O principal deles é que, para o projeto ser viável economicamente, o mesmo não deve resultar em prejuízo (ou, caso isto ocorra, não pode ser alto e deve ser justificável).

Para que o prejuízo seja evitado (e, se possível, a obtenção de um lucro seja alcançada) é necessário dividir este caso em dois tópicos: custos e receitas. Após um estudo mais detalhado de cada tópico, é possível obter uma conclusão baseada em fatos e números. Também é bastante razoável que o estudo seja feito por gerador, de forma a concluir quais geradores são viáveis ou não (afinal, cada gerador funciona de forma independente, de forma que alguns podem ser interessantes e outros nem tanto).

É bastante interessante ressaltar que nem sempre a melhor ideia no âmbito financeiro é aplicada. De acordo com o *site* Tecmundo, a empresa de aviação “Gol” realizou um voo misturando óleo de cozinha reciclado à querosene de aviação (QAV), resultando no combustível bioQAV. Este novo combustível possui a mesma eficiência, mas o litro do óleo de cozinha reciclado custa 375% do litro do QAV. Esta alteração pode ser vista de vários modos, mas é interessante para ressaltar que o custo é importante, porém é apenas um fator envolvido. Cada vez mais ocorre a procura por fontes de energia limpas ou reaproveitadas, e este fator, às vezes, pode ser mais relevante do que o preço.

5.1 RECEITAS

Inicialmente, é razoável prever quanto que cada máquina deve gerar de energia elétrica. O dinheiro que a geração tornará possível economizar é igual à quantidade de energia elétrica gerada multiplicada pelo preço de mercado da mesma.

O preço de mercado é uma variável que não é possível de ser alterada de forma individual, logo, não é controlável por apenas um elemento do sistema. Além disso, o mesmo

pode variar. Uma análise perfeita deve considerar a variação do preço da energia elétrica descontada da inflação, para a obtenção de um resultado real.

A quantidade de energia gerada é função da quantidade de água que passa pelo gerador e da pressão/velocidade da água que passa pelo mesmo, logo, é função exclusiva da posição do mesmo, o que torna ainda mais importante a escolha de bons lugares para a instalação.

Se desejado, também é interessante descontar uma taxa de investimento mínimo, que nada mais é que uma taxa que indica a partir de qual porcentagem de lucro um investimento é interessante para um investidor. Dessa forma, é possível estimar de forma bastante fiel a realidade de quanto que cada gerador individualmente geraria de receitas, e, com isto, passar para uma segunda parte da análise.

Para uma estimativa grosseira, será utilizado como exemplo o valor calculado do somatório dos aproveitamentos. De acordo com a CEEE, a energia do exemplo no capítulo 4 custaria ao consumidor R\$ 22,27 mensais, logo, esta pode ser considerada a receita. Entretanto, quanto maior o consumo residencial, mais caro o preço da energia, logo, na prática, deixar de consumir esta energia da rede (ou vendê-la em horário de pico) acarretará numa receita maior.

5.2 CUSTOS

Todo investimento deste porte possui custos. Uma análise racional dos custos é complementar a análise de receitas para a realização ou não do investimento.

Os custos podem ser divididos em dois grandes grupos: o custo inicial (ou de implementação) e os custos de manutenção.

5.2.1 Custos iniciais

Os custos iniciais são provavelmente os custos mais fáceis de serem obtidos com precisão, visto que, são os custos do equipamento e da instalação do mesmo. Por equipamento, se deve entender os geradores e todos os equipamentos de controle relacionados aos mesmos, além de eventuais alterações da estrutura do prédio que acarretem em algum custo adicional. A maior parte destes valores é possível de ser obtido em catálogos de máquinas elétricas.

A depreciação destes itens também precisa ser considerada. É importante que todos os componentes do sistema “se paguem” dentro do seu prazo de vida útil, sendo este um relevante critério quanto ao estudo de viabilidade econômica.

Devido a baixa receita mensal, estes custos dificilmente pagar-se-ão para o conjunto completo. Dividindo-se esses por partes, provavelmente a parte de geração de energia devido a pressão da rede pública conseguirá retornar o investimento, visto que é simples e gera boa quantidade de energia, entretanto, o sistema de geração com o esgoto necessita de mudanças na construção, de um maior número de geradores e de um bom sistema de controle e confiabilidade, de tal forma que, provavelmente é inviável, ao menos enquanto a energia não tornar-se ainda mais cara.

5.2.2 Custos operacionais

O sistema possui custos de funcionamento, que são custos relativos à própria geração. Esses custos necessariamente devem ser menores do que a receita, ou o funcionamento do sistema por si só já é oneroso financeiramente. Os custos de funcionamento são todos os custos relativos à geração (e dependem diretamente da quantidade gerada), além dos custos de manutenção.

Para estes sistemas, basicamente os custos são apenas de manutenção, visto que a geração ocorre de forma automatizada com recursos que seriam perdidos. Para que o sistema seja viável no exemplo, basta que o sistema gaste menos do que 267 reais por ano em manutenção. Visto que, esse sistema não funcionará de forma contínua por todo o tempo, o mesmo possuirá uma grande durabilidade, e com isto não necessitará de muita manutenção. Logo, provavelmente, na maior parte dos casos, o sistema é viável. Para uma avaliação mais precisa, pode ser interessante dividir o custo da manutenção e a energia gerada entre as três possibilidades indicadas.

5.3 CONCLUSÃO FINANCEIRA

Cada gerador só é economicamente viável caso sua receita seja, no mínimo, superior aos custos. No caso de apenas alguns geradores o serem, é razoável que apenas estes sejam instalados. Apenas em situações especiais é recomendável instalar uma máquina elétrica que resultará em prejuízo.

Como mostrado por indução nos casos acima, a geração com a pressão da água da rede pública possui capacidade inclusive de conseguir superar os custos iniciais, entretanto, o caso do aproveitamento do esgoto precisa ser estudado de forma mais detalhada, principalmente devido ao alto custo e dificuldade de implementação (devido as alterações necessárias no projeto civil do prédio, não deve ser realizada em prédios já construídos). A geração com a água da chuva pode retornar o investimento inicial, mas provavelmente demorará muito para isto, a ponto que pode ser mais interessante utilizar esta água para outras aplicações no prédio (como a utilização nos vasos sanitários e para limpeza de calçadas).

6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES

O presente trabalho permite um aproveitamento de uma nova fonte, cuja energia seria dissipada de forma sustentável e energeticamente viável.

Apesar das dificuldades (principalmente hidráulicas), o projeto é viável no âmbito da engenharia, pois durante o trabalho foi possível propor uma solução para todos os problemas identificados tanto na parte hidráulica quanto na parte elétrica. Algumas dessas soluções não são triviais, exigindo assim, um grande investimento e formas novas abordando problemas antigos, entretanto, ao menos em caráter teórico, funcionam.

No âmbito energético, mesmo não tendo obtido um resultado espetacular, já é possível observar que, se aplicada em larga escala, a solução pode colaborar para a diminuição da descarga de água nas turbinas de hidroelétricas. A solução proposta funciona perfeitamente no âmbito do reaproveitamento energético e da sustentabilidade. A grande dificuldade seria implantar o sistema em larga escala, visto que, para prédios já construídos parte dele mostrar-se-á inviável e a outra parte irá exigir um investimento relevante.

No âmbito econômico o projeto mostrou-se parcialmente viável. Nem todas as ideias são financeiramente possíveis hoje, mas, com a tendência de variação do preço da energia devido ao aumento de demanda e menor possibilidade do aumento de oferta, as mesmas podem se tornar viáveis futuramente. O aproveitamento da pressão pública mostrou-se muito promissor inclusive neste aspecto.

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se um estudo específico sobre o controle do sistema hidráulico e elétrico (utilizando por exemplo, um CLP), de forma a viabilizar as ideias propostas durante o trabalho. Além disso, uma sugestão óbvia é a implementação de um projeto piloto, de modo a obter dados reais relativos ao mesmo.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. Tarifa Branca. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=781&idPerfil=4>>. Acesso em: 7 nov. 2013.
- ASSOCIAÇÃO Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5626**: Instalação predial de água fria. Rio de Janeiro, 1998.
- _____. **NBR 8160**: Sistemas prediais de esgoto sanitário - Projeto e execução. Rio de Janeiro: 1999.
- _____. **NBR 10844**: Instalações prediais de águas pluviais. Rio de Janeiro: 1989.
- CEEE. **Valor simplificado da conta**. Disponível em: <<http://www.cee.com.br/pportal/cee/component/controller.aspx?CC=1248>>. Acesso em: 19 nov. 2013.
- CORSAN. Regulamento de Serviços de Água e Esgoto da CORSAN. DOE. Porto Alegre, 2009.
- CHAPMAN, S. J. *Electric machinery fundamentals*. Boston: McGraw-Hill 2005.
- EMPRESA de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2013. **Ano base 2012**: relatório síntese. Rio de Janeiro: EPE, 2013. 55p.
- FARRET, A. F. **Aproveitamento de pequenas fontes de energia elétrica**. Santa Maria: Editora da UFSM, 1999.
- _____; SIMÕES, M. G. *Integration of Alternative Sources of Energy*. Hoboken: Willey-IEEE Press, 2006.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C. JR.; UMANS, S. D. **Máquinas elétricas**. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- GEHLING, G. R. **Instalações hidrosanitárias**. (2010). Notas de aula.
- INSTITUTE of Electrical and Electronics Engineers - **IEEE 1547**: *Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*. Nova Iorque: 2003.
- MACINTYRE, A. J. **Instalações hidráulicas**: prediais e industriais. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
- MEDEIROS, Daniel de Macedo. **A utilização de bombas operando como turbinas e geradores de indução na geração de energia elétrica**. (2004). 129 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia, Itajubá, 2004.
- TECMUNDO. Voo à base de querosene e óleo de cozinha reciclado é feito pela Gol. Disponível em: <<http://www.tecmundo.com.br/aviao/46086-voo-a-base-de-querosene-e-oleo-de-cozinha-reciclado-e-feito-pela-gol.htm>>. Acesso em: 27 out. 2013.