

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ - UTFPR
PÓS-GRADUAÇÃO *LATU SENSU* EM ENGENHARIA DIGITAL E TECNOLOGIA
BIM

BERNARDO JOSÉ PINTO DO COUTO NUNES PERNA

VALOR AGREGADO AO PROCESSO DE GERENCIAMENTO DE
PROJETO DE USINAS HIDRELÉTRICAS PELO USO DE BIM E
ALGORITMOS GENERATIVOS NA MODELAGEM DE CAIXA ESPIRAL E
TUBO DE SUCÇÃO DE TURBINAS

CAMPUS CURITIBA
2019

BERNARDO JOSÉ PINTO DO COUTO NUNES PERNA

**VALOR AGREGADO AO PROCESSO DE GERENCIAMENTO DE
PROJETO DE USINAS HIDRELÉTRICAS PELO USO DE BIM E
ALGORITMOS GENERATIVOS NA MODELAGEM DE CAIXA ESPIRAL E
TUBO DE SUCÇÃO DE TURBINAS**

Trabalho de Conclusão de Curso como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Engenharia Digital e Tecnologia BIM, do Departamento Acadêmico de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Adriano Balduino dos Santos

**CAMPUS CURITIBA
2019**



TERMO DE APROVAÇÃO

VALOR AGREGADO AO PROCESSO DE GERENCIAMENTO DE PROJETO DE USINAS HIDRELÉTRICAS PELO USO DE BIM E ALGORITMOS GENERATIVOS NA MODELAGEM DE CAIXA ESPIRAL E TUBO DE SUCÇÃO DE TURBINAS

por

BERNARDO JOSÉ PINTO DO COUTO NUNES PERNA

Esta Monografia foi apresentada em 09 de setembro de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de **Especialista em ENGENHARIA DIGITAL E TECNOLOGIA BIM**. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Adriano Balduino dos Santos
Prof. Orientador

Fábio Freire
Membro titular

Heverson Akira Tamashiro
Membro titular

AGRADECIMENTOS

Ao orientador, professor Adriano Balduino dos Santos, pelo incentivo e indicações dos caminhos para solução de vários desafios que surgiram no decorrer desta produção acadêmica.

Ao engenheiro Rafael Cheang, pelas orientações na linguagem Python e generosa disposição de seu tempo.

À arquiteta Flávia Biccias da Silva Polonini, cuja dissertação de mestrado sobre modelagem paramétrica de formas curvilíneas na arquitetura baseou toda a parte do referencial teórico deste trabalho referente a esse assunto.

Ao coordenador do curso de Engenharia Digital e Tecnologia BIM da UTFPR, professor Fábio Freire, pela disponibilização de muitas matérias de interesse e dos recursos de informática necessários a esta produção acadêmica.

Aos demais professores e colegas do curso, pela contribuição com ideias, discussões e companheirismo.

Aos colegas e amigos da COPEL Geração e Transmissão S.A., pelo conhecimento técnico compartilhado ao longo dos anos de trabalho juntos, pela amizade construída e pelas respostas aos questionamentos formulados.

À minha família, especialmente à minha esposa, Regina Lúcia Natal Nunes Perna, pelo inestimável apoio em todas as situações.

PERNA, B. **Valor agregado ao processo de gerenciamento de projeto de usinas hidrelétricas pelo uso de BIM e algoritmos generativos na modelagem de caixa espiral e tubo de sucção de turbinas.** Monografia (Especialização em Engenharia Digital e Tecnologia BIM) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

RESUMO

O presente trabalho pretende identificar que valor pode ser agregado ao processo de gerenciamento de estudos e projetos de aproveitamentos energéticos mediante incorporação de informação da construção na modelagem da caixa espiral e tubo de sucção de turbinas hidráulicas, norteados pela hipótese de que tais recursos tendem a reduzir prazos e custos, comparativamente ao processo de projeto sem BIM, e ao mesmo tempo podem aumentar a qualidade, integração e precisão das informações gerenciais. A metodologia envolve seleção do objeto para estudo, desenvolvimento e descrição da modelagem com utilização de BIM incluindo uso de algoritmos generativos, comparação com o processo convencional e análise dos resultados.

Palavras-chave: BIM; Modelagem da Informação da Construção; Algoritmos Generativos; Turbinas Hidráulicas; Caixa Espiral e Tubo de Sucção.

PERNA, B. ***Added value to project management process of hydroelectric powerplants by using BIM and generative algorithms in modeling of spiral box and turbines suction tube.*** Monography (Specialization in Digital Engineering and BIM Technology) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

ABSTRACT

This work intends to identify which value can be added to the management process of energy generation studies and design by incorporating building information in the spiral case and draft tube of hydraulic turbines modeling, leaded by the hypothesis that such resources tend to reduce deadlines and costs, compared to the design process without BIM, and at the same time can increase the quality, integration and accuracy of management information. Methodology involves selection of the object, development and description of the modeling process using BIM including generative algorithms, comparison with the conventional process and analysis of the results.

Keywords: BIM; Building Information Modeling; generative algorithms; spiral box; hydraulic turbines.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

FIGURA 1 - CORTE ESQUEMÁTICO DAS PRINCIPAIS PARTES DE UMA USINA HIDRELÉTRICA	10
FIGURA 2 - EXEMPLO DE EQUAÇÃO PARAMÉTRICA E SUA REPRESENTAÇÃO.....	20
FIGURA 3 - EXEMPLO DE UMA SPLINE NÃO UNIFORME.....	21
FIGURA 4 - EXEMPLO DE UMA CURVA B-SPLINE	21
FIGURA 5 - MANIPULAÇÃO DE NURBS MEDIANTE TRANSFORMAÇÕES GEOMÉTRICAS.....	22
FIGURA 6 - DUAS DIFERENTES NOTAÇÕES DE LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO.....	23
FIGURA 7 - ESQUEMA DE REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE UM ALGORITMO.....	25
FIGURA 8 - MODELAGEM DE UM TRIÂNGULO NO RHINOCEROS - GRASSHOPPER	26
FIGURA 9 - CAIXA ESPIRAL DE UMA TURBINA TIPO FRANCIS DE EIXO VERTICAL.....	32
FIGURA 10 - ROTOR DE UMA TURBINA TIPO FRANCIS.....	32
FIGURA 11 - CORTE ESQUEMÁTICO EM 3D DE UMA TURBINA TIPO FRANCIS DE EIXO VERTICAL.....	33
FIGURA 12 - ALGUMAS DAS VARIÁVEIS REPRESENTADAS POR NUMBER SLIDERS....	37
FIGURA 13 - CÁLCULO DAS ESPESSURAS $[t_1 \text{ min}]$, $[t_2 \text{ min}]$ DO AÇO PARA A CAIXA ESPIRAL.....	38
FIGURA 14 - PROPORÇÕES BÁSICAS PARA CAIXA ESPIRAL RECOMENDADAS PARA TURBINAS FRANCIS ...	39
FIGURA 15 - ASPECTO VISUAL GERAL DO ALGORITMO DESENVOLVIDO	41
FIGURA 16 - TUBO DE SUÇÇÃO COM DOIS RAMOS $[DS \leq 2,13\text{m}]$	43
FIGURA 17 - TUBO DE SUÇÇÃO COM TRÊS RAMOS $[DS > 2,13\text{m}]$	43
FIGURA 18 - TRANSIÇÃO ENTRE AÇO A516 E CONCRETO $[v < 5\text{m/s}]$	46
FIGURA 19 - QUANTIDADES DOS MATERIAIS INTEGRADAS AO MODELO.....	49
FIGURA 20 - MODELO INTEGRADO NO ARCHICAD	49
FIGURA 21 - EXEMPLO DE RELATÓRIO DE QUANTIDADES NO ARCHICAD.....	50
FIGURA 21 - IMPACTO DAS MUDANÇAS CONFORME A EVOLUÇÃO DO PROJETO.....	53

TABELAS

TABELA 1 - SÍNTESE DA GAMA DE COMPONENTES DO GRASSHOPPER	27
TABELA 2 - VELOCIDADES MÁXIMAS ADMISSÍVEIS CONFORME O MATERIAL.....	38
TABELA 3 - APROPRIAÇÃO DA MÃO-DE-OBRA NA MODELAGEM DE ESTRUTURAS CIVIS 3D	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEC	– Arquitetura, Engenharia e Construção
BIM	– <i>Building Information Modeling</i>
CAD	– <i>Computer Aided Design</i>
CAM	– <i>Computer Aided Manufacture</i>
CFD	– <i>Computational Fluid Dynamics</i>
CNC	– Controle Numérico Computadorizado
FEM	– <i>Finite Element Method</i>
GH	– <i>Grasshopper</i>
IFC	– <i>Industry Foundation Classes</i>
IPD	– <i>Integrated Project Delivery</i>
NURBS	– <i>Non Uniform Rational Basis Spline</i>
2D	– Duas dimensões
3D	– Três dimensões

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1 JUSTIFICATIVA	10
1.2 OBJETIVO GERAL	12
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 MODELAGEM CONVENCIONAL NO ESTUDO DE TURBINAS	14
2.2 MODELAGEM PARAMÉTRICA	14
2.3 ALGUMAS FORMAS GEOMÉTRICAS DE INTERESSE	19
2.4 ALGORITMOS GENERATIVOS	23
2.5 CONEXÃO ENTRE MODELAGEM PARAMÉTRICA E BIM	27
3. METODOLOGIA	29
3.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA	29
3.2 LINHA DE PESQUISA	30
3.3 SELEÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO	31
3.4 MODELAGEM DO OBJETO DE ESTUDO	34
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1 PROCESSO DE GERENCIAMENTO DE PROJETO SEM BIM	47
4.2 PROCESSO DE GERENCIAMENTO DE PROJETO COM BIM	48
4.3 COMPARAÇÃO DOS PROCESSOS	50
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

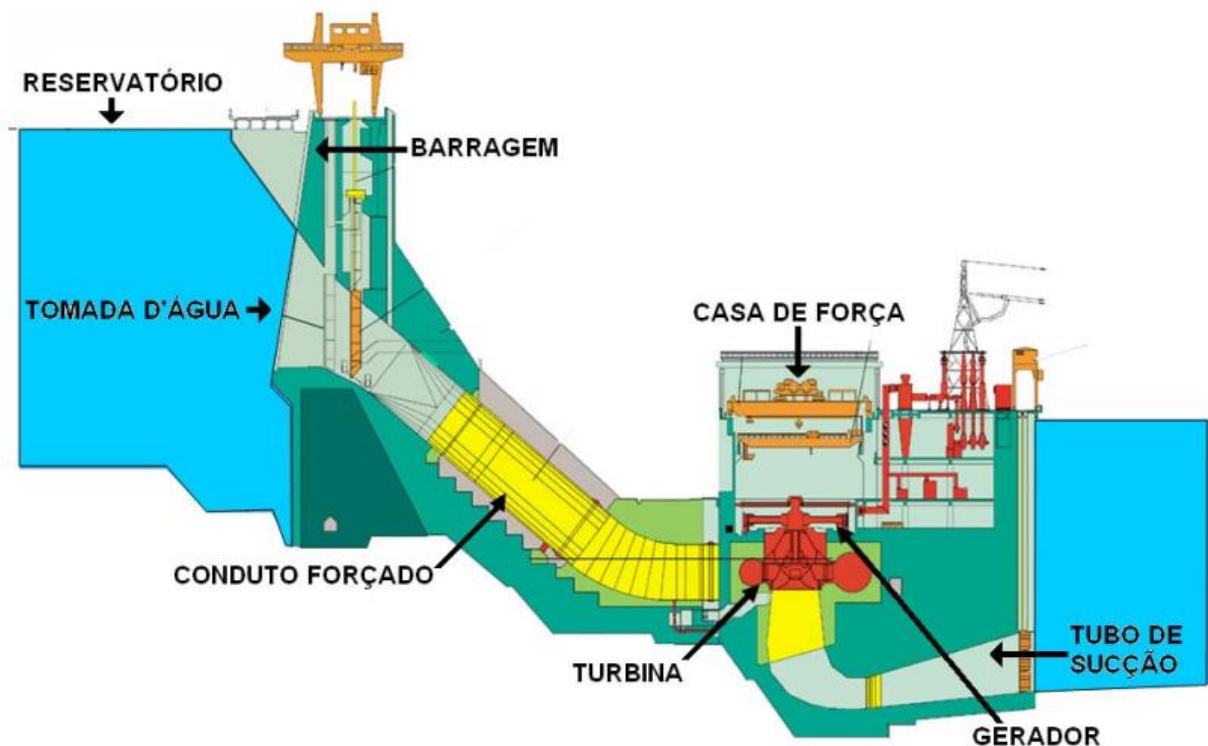
A matriz energética no Brasil é predominantemente hidráulica. O aproveitamento dessa fonte requer a construção de usinas hidrelétricas, nas quais a água de um rio, represada em um reservatório, é conduzida a turbinas hidráulicas que transformam a energia mecânica decorrente da queda d'água em energia elétrica. O nível do reservatório, denominado de nível de montante, é o nível mais alto da água. A água desce do reservatório por dutos capazes de dar vazão ao volume armazenado, chamados de condutos forçados, transformando a energia potencial em energia cinética e mecânica, ao girar as turbinas. Cada turbina é acoplada a um gerador, no qual a energia mecânica é transformada em energia elétrica. Após passar pelas turbinas, a água é restituída ao rio por um canal de restituição, depois da barragem, em um nível mais baixo, denominado nível de jusante. A energia produzida pelos geradores é conduzida a uma subestação elevadora de tensão para permitir sua transmissão a longas distâncias através de cabos elétricos, pois os centros de consumo normalmente encontram-se distantes da usina. As linhas de transmissão chegam a subestações próximas aos centros de consumo, que rebaixam a tensão para níveis intermediários e depois seguem por linhas de distribuição a subestações que reduzem novamente a tensão a níveis apropriados para que a energia seja levada às indústrias, estabelecimentos comerciais e residências.

De modo geral, as estruturas principais das usinas hidrelétricas são constituídas de reservatório, barragem, vertedouro, tomada d'água, condutos forçados e casa de força (Figura 1). A água do reservatório entra pela tomada d'água nos condutos forçados e vai até a casa de força, onde são instaladas as turbinas e geradores, equipamentos cuja finalidade é garantir a geração de energia elétrica esperada.

Os condutos forçados são conectados à entrada das turbinas, constituída por uma "caixa espiral", que possui a forma de uma concha de caracol. A caixa

espiral caracteriza-se por uma secção de área decrescente que tem por finalidade propiciar condições de vazão, pressão e velocidade da água adequadas para que se obtenha o máximo aproveitamento da energia. Ao final da caixa espiral a água é conduzida ao rotor da turbina, que possui “pás” ligadas a um eixo, que por sua vez é acoplado ao eixo do gerador. A pressão da água sobre as pás produz um movimento giratório no eixo da turbina que se transmite ao eixo do gerador. O movimento do eixo do gerador cria um campo eletromagnético que permite a produção de energia elétrica.

FIGURA 1 - CORTE ESQUEMÁTICO DAS PRINCIPAIS PARTES DE UMA USINA HIDRELÉTRICA



Fonte: SENA, 2008

1.1 JUSTIFICATIVA

Os estudos de aproveitamentos de geração hidrelétrica envolvem riscos geológicos, hidrológicos, estruturais e sócio-econômicos importantes, de extensa envergadura, que necessitam de análise acurada e longo período de avaliação (5 a 15 anos para estudos e planejamento do sistema construtivo, com vistas a um horizonte de operação de pelo menos 30 anos).

A qualidade das investigações necessárias ao gerenciamento dos estudos vem decaindo ao longo do tempo, em face da forma de remuneração instituída para esses serviços. As empresas que atuam no setor elétrico nacional veem tendo prazos mais curtos para o trabalho e remuneração cada vez menor, o que as tem levado a diminuir a abrangência das campanhas investigativas que servirão de base para o desenvolvimento do projeto na fase de contratação seguinte. Ao mesmo tempo, o processo de gerenciamento de projetos tem envolvido desdobramentos mais intrincados sobre os estudos de viabilidade técnica-econômica e exigido análise de alternativas adicionais às que baseiam as licitações de concessão de geração de energia.

Adentrando no aspecto do dimensionamento da casa de força em usinas hidrelétricas, salienta-se que a seleção de turbinas hidráulicas tem implicações construtivas muito importantes. O posicionamento das turbinas define as fundações, os espaços de operação e montagem, o posicionamento dos geradores, das comportas-ensecadeiras, da ponte rolante e a estrutura principal. A modelagem de turbinas praticamente estabelece o tamanho e conseqüentemente o custo das estruturas da casa de força.

No circuito por onde a água entra, circula e sai da turbina para gerar a energia, a caixa espiral e o tubo de sucção apresentam, como já indicado, geometria complexa. As peças que constituem esses elementos possuem secções variáveis em curva, apresentam grande peso, são numerosas. E variações na geometria conduzem a variações significativas nos custos dos materiais envolvidos. Por exemplo, o aço que estrutura as paredes da caixa espiral pode alcançar vários centímetros de espessura. Sua adequada representação gráfica e a montagem na obra constituem desafios consideráveis. Exigem precisão e, portanto, tempo adequado para sua modelagem, alto grau de especialização da mão-de-obra, desde o gerenciamento dos estudos e modelagem do projeto, assim como durante todo o processo de fabricação, corte, dobra, solda e montagem das peças.

Em resumo, tais condições, especialmente porque resultam de estudos de

várias alternativas, demandam uso intensivo de mão-de-obra qualificada, ao passo que as simplificações decorrentes de prazos mais curtos e campanhas de investigação mais superficiais reduzem a precisão da análise.

Metodologias de projeto inovadoras, dentre as quais destaca-se o BIM, podem configurar-se uma opção para minorar as perdas ocasionadas no contexto descrito e agilizar a análise das alternativas a estudar, oferecendo suporte mais rápido e preciso ao projeto de casas de força que, conforme já indicado, abrigam turbinas e geradores destinados a garantir a produção desejada de energia mediante gerenciamento adequado dos riscos envolvidos. Como ainda não há normatização e bibliotecas BIM suficientemente elaborados para obras de infraestrutura, muitos padrões ainda precisam ser desenvolvidos para possibilitar a incorporação dessa metodologia de modelagem aos processos correntes de projeto.

1.2 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho acadêmico estudará que ganhos ao processo de gerenciamento de estudos e projetos de usinas hidrelétricas poderão advir da modelagem com informação da construção – BIM, aplicada à caixa espiral e ao tubo de sucção de turbinas hidráulicas¹.

O objetivo do trabalho é apresentar um processo capaz de reduzir o número de horas de modelagem desses elementos e integrar informações da construção ao modelo que permitam, por exemplo, a exportação automatizada de quantidades de materiais conforme a alteração dos parâmetros utilizados, reduzindo assim custos de projeto. Desta forma pretende-se obter quantidades para orçamento com maior rapidez e consistência, se comparados a processos de gerenciamento de projetos sem BIM, gerando informações úteis à otimização da tomada de decisões sobre a viabilidade das alternativas técnicas.

¹ Ver item 3.1 – Delimitação do tema.

O processo com BIM será comparado ao processo corrente de projeto sem BIM, com o intuito de identificar que valor pode ser agregado ao processo, norteado pela hipótese de que tais recursos tendem a reduzir prazos e custos, e ao mesmo tempo podem aumentar a qualidade, integração e precisão das informações gerenciais que dão suporte às decisões que definirão os sistemas construtivos.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Levantar dados de processos de gerenciamento de projeto de usinas hidrelétricas sem BIM em uma empresa geradora de energia²;
2. Desenvolver a geometria da caixa espiral de uma turbina e seu tubo de sucção, em software de modelagem paramétrica adequado à sua complexidade, e parametrizá-la mediante uso de algoritmos generativos³;
3. Agregar informações de materiais à modelagem da geometria, utilizando software BIM⁴ certificado pela *Building Smart*, afim de gerar tabelas de quantidades integradas ao modelo, que facilitem posterior análise dos custos pertinentes e a consequente tomada de decisões de projeto;
4. Desenvolver e descrever o processo de modelagem com BIM realizado neste trabalho acadêmico;
5. Comparar os processos sem BIM e com BIM e efetuar análise qualitativa de valor agregado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Grande parte do referencial teórico deste trabalho baseia-se na abordagem feita por Polonini (2014), cuja pesquisa referente à modelagem paramétrica na arquitetura aderiu de maneira especialmente oportuna ao propósito deste trabalho,

² Ver item 3.1 – Delimitação do tema.

³ Ver item 3.3 – Seleção do objeto de estudo. Seleção dos softwares para modelagem.

⁴ Idem.

no que tange à explicação da evolução da modelagem digital de formas curvilíneas e à conceituação de algoritmos generativos.

2.1 MODELAGEM CONVENCIONAL NO ESTUDO DE TURBINAS

A grande maioria das empresas do ramo trabalha com bons softwares CAD, porém sem incorporar recursos BIM. Trata-se de concessionárias de energia e projetistas de obras de infraestrutura, que contam com profissionais de alto nível de especialização técnica e desenvolveram procedimentos próprios para tornar tão fácil e ágil o trabalho de modelagem quanto a tecnologia em uso o permite. Os dados de entrada são inseridos em planilhas previamente adequadas ao projeto e softwares de cálculo mecânico, estrutural, hidráulico, elétrico, processam os dados, gerando subsídios para a modelagem das estruturas e geração de desenhos construtivos. Desenhistas então passam a representar apenas a geometria das estruturas nos softwares CAD, a maioria em 2D. Pouquíssimas empresas modelam todo o processo em 3D. As alternativas a serem estudadas requerem que a modelagem seja refeita, copiando-se as partes sem alteração e projetando-se novamente as partes que se deseja modificar. Assim, e devido ao porte e complexidade desses empreendimentos, muita mão-de-obra qualificada é necessária aos estudos e à modelagem desse tipo de estruturas, conforme será demonstrado no comparativo entre o processo corrente e o proposto neste trabalho⁵.

2.2 MODELAGEM PARAMÉTRICA

A modelagem paramétrica é um método de representação virtual onde os objetos são formados por meio de lógicas e regras estruturantes que oferecem maior controle e interação das propriedades geométricas e das relações entre elas.

⁵ Ver item 4.1 – Processo de gerenciamento de projeto sem BIM

Lee, Sacks e Eastman (2006, p. 760 apud POLONINI, 2014) definem modelagem paramétrica como o processo de modelagem no qual o usuário pode construir e controlar o meta-modelo (*template*) de um objeto, abrangendo a forma e o comportamento, através da parametrização de atributos geométricos ou de outra natureza e da configuração de restrições, declarados ao usuário e **mantidos automaticamente pelo sistema computacional** baseado em modelagem sólida. Um grande atrativo dessa ferramenta é a sua **capacidade de gerar várias alternativas** de projeto, como as variações paramétricas (HOFFMAN; JOAN-ARINYO, 2002, p. 519 apud POLONINI, 2014. Grifo nosso), em **tempo menor** do que com ferramentas não paramétricas. Isso acontece porque a modelagem paramétrica reduz o esforço necessário para a mudança do projeto e reutilização de seus elementos. Além disto, não só aumenta a produtividade na atividade de projetar (SHAPIRO; VOSSLER, 1995, p. 51 apud POLONINI, 2014. Grifo nosso), mas também proporciona um **ganho de qualidade**, pois permite um processo iterativo de ajuste fino e contínuo do projeto (BURRY, 1996, p. 79 apud POLONINI, 2014. Grifo nosso). Outro incentivo para o uso dessa ferramenta é a sua **capacidade de explorar configurações geométricas mais complexas** (FLORIO, 2009, p. 572 apud POLONINI, 2014. Grifo nosso), uma vez que a modelagem paramétrica possibilita ao usuário maior controle da forma, pois ele pode criar e manipular relações paramétricas, transformações e restrições entre elementos (MADKOUR; NEUMANN; ERHAN, 2009, p. 589 apud POLONINI, 2014). Tal habilidade pode ser expandida para proporcionar **geração semiautomática de formas** (AISH; WOODBURY, 2005, p. 151 apud POLONINI, 2014. Grifo nosso), similar ao *Generative Design*. Por outro lado, para alcançar tal controle geométrico, geralmente, é necessário aumentar o nível de rigor das etapas construtivas das formas, que por sua vez pode ser alcançada com uma aproximação do conteúdo matemático da descrição dos elementos geométricos pelo usuário (HERNANDEZ, 2006, p. 322 apud POLONINI, 2014). Neste procedimento de modelagem, rotinas (*scripts* ou roteiros) que contêm uma sequência de passos repetitivos utilizados para

construir um objeto são escritas em uma linguagem de programação, permitindo que – mais que representar a geometria, os trabalhos repetitivos sejam processados automaticamente e a variação de parâmetros também seja automatizada. A vantagem da modelagem paramétrica é permitir a produção de meta-modelos (*templates*) de objetos que podem ser reutilizados durante o projeto, automatizando a representação de elementos construtivos, por meio da entrada de parâmetros, **sem que o usuário tenha que desenhar ou modelar** cada componente. (MITCHELL; MCCULLOUGH, 1991, p. 405; EASTMAN, 1999, p. 46 apud POLONINI, 2014. Grifo nosso). Assim, a modelagem paramétrica otimiza os procedimentos de modelagem, não apenas porque **diminui o retrabalho existente** no momento de realizar alterações no modelo, como também porque **automatiza operações repetitivas** de modelagem.

A partir da metade da década de 1990, pesquisadores da área de arquitetura começaram a usar técnicas de animação e simulação para criar métodos de geração de forma arquitetônica, área de pesquisa denominada de *Generative Design* (GU; SINGH; MERRICK; 2010, p. 1 apud POLONINI, 2014). Essa abordagem computacional aplica diferentes técnicas de controle de movimento e comportamento, criados para programas de simulação, de modo a conceber formas. Dentre essas técnicas, pode-se citar redes neurais, algoritmos genéticos, modelos evolutivos, e que algumas delas se apoiam nos conhecimentos B-rep e CSG⁶, particularmente adequados para gerar e controlar formas complexas.

⁶ Na modelagem de sólidos e no desenho auxiliado por computador, a representação abreviada como B-rep ou BREP é um método para representar formas usando os limites. Um sólido é representado como uma coleção de elementos de superfície conectados, o limite entre sólido e não sólido. A representação de limites dos modelos é composta de duas partes: topologia e geometria (superfícies, curvas e pontos). Os principais itens topológicos são: faces, arestas e vértices. Outros elementos são o *shell* (um conjunto de faces conectadas), o *loop* (um circuito de bordas que delimitam uma face) e *links* de borda de *loop*, que são usados para criar os circuitos de borda. Em comparação com a representação de geometria sólida construtiva (CSG), que usa apenas objetos primitivos e operações booleanas para combiná-los, a representação de limite é mais flexível e possui um conjunto de operações muito maior. Além das operações booleanas, o B-rep possui extrusão, chanfro, mistura, desenho, ajustes e outras operações. https://en.m.wikipedia.org/wiki/Boundary_representation. Ao incluir operações de combinação de volumes (as operações booleanas) as pequenas ações de edição antes realizadas pelo usuário foram automatizadas e o processo simplificou a criação de objetos mais complexos (EASTMAN, 1999, p. 42-43).

Alguns métodos de concepção de formas da técnica computacional não possuem similares entre as ferramentas de desenho ou de construção de modelos físicos, o que amplia as opções destas técnicas oferecidas ao projetista. Isso pode ser percebido na construção de formas mais complexas ao se utilizar operações booleanas ou interpolando as diferentes formas, ou ainda, criar transformações em uma superfície por pontos de controle. Devido a isso, conforme Polonini (2014, p.260), pode-se afirmar que “a ferramenta de modelagem paramétrica possibilita a construção de uma extensa série de formas, ampliando assim a gama de métodos de concepção de formas disponíveis ao usuário, principalmente em relação às técnicas anteriores, como a modelagem geométrica e no tocante as formas curvas.”

Com efeito, Polonini (2014, p.129) a respeito da modelagem de formas curvas afirma que:

[...] a geometria diferencial e a geometria não-euclidiana ofereceram mais recursos para a definição matemática, cada vez mais precisa, de formas curvas. [...] [A geometria tem sido utilizada] como ferramenta de representação de modelos idealizados de objetos do mundo físico, especialmente em ambiente computacional, ao codificar [...] definições matemáticas em linguagem de programação e, assim, estabelecer a modelagem geométrica. Esse ramo da ciência da computação está na base das ferramentas computacionais aplicadas ao projeto e por isso também deu suporte ao aumento da complexidade do objeto [a ser modelado]. Essas formas mais complexas podem ser relacionadas às novas técnicas de modelagem, principalmente, a geração de superfícies por formas livres (*free-form*) e transformações por deformações ou geração automatizada de formas, como os modelos evolutivos.

Polonini (2014, p.263) afirma ainda que a modelagem geométrica, mais antiga, representa objetos através de elementos abstratos, que estão isolados uns dos outros. Na modelagem paramétrica, mais recente, pode-se criar as associações entre esses elementos de modo a trabalhar com um conjunto deles e até chegar a criar comportamentos para eles. Na modelagem geométrica o método mais adequado para gerar as formas curvilíneas é por formas livres, que pelo ponto de vista do usuário possui uma operacionalidade mais aproximada com os métodos naturais, por exemplo moldar em argila uma escultura. Neste caso, pode-se considerar uma manipulação direta da forma, no sentido que se trabalha sobre a

visualização dela, utilizando-se do cursor do mouse como um substituto da mão do projetista, assim criando uma ideia de “contato” com a forma.

Ao passo que, na modelagem paramétrica gera-se o objeto por parametrização geométrica da forma, das ações de modelagem e das relações entre os elementos do objeto. Neste caso, pode-se considerar uma manipulação indireta da forma, no sentido que se trabalha sobre os parâmetros, que, comumente, são expressos por notações (textos ou ícones). A alteração destes parâmetros pelo usuário é automaticamente realizada pelo programa, que se torna mais um “intermediário” entre a forma criada e o usuário. Assim, a modelagem paramétrica “[...] estende a capacidade humana de imaginar e de combinar grandes quantidades de dados e informações [...] deixando para o computador a tarefa de processar dados extremamente complexos” (FLÓRIO, 2012, p. 18 apud POLONINI, 2014).

A modelagem paramétrica apresenta maior velocidade e facilidade para ajustar automaticamente os elementos padrão de modulações de uma superfície e sobretudo confere ao modelo maior precisão das formas criadas. Se uma forma fosse modelada em modelagem geométrica 3D utilizando-se manipulação por formas livres, o resultado final seria uma aproximação e possivelmente conteria imprecisões, uma vez que modelar individualmente cada módulo é um processo complexo, repetitivo e propenso a erro humano. Quando se trata de certas formas curvas irregulares, se fossem criadas por modelagem geométrica, ou até mesmo modelos físicos, não apenas o resultado formal seria diferente do criado por modelagem paramétrica, como implicaria em um processo de modelagem diferente.

Para Polonini (2014, p. 265), “O desafio de construir um modelo paramétrico é encontrar um conjunto de regras que seja o mais simples possível, mantendo-se flexível o suficiente para acomodar possíveis casos de alterações. Para se gerar um modelo paramétrico do projeto é necessário investir um bom tempo no planejamento dos parâmetros e das relações do meta-modelo, antes de começar a realmente construí-lo em ambiente computacional. ” A grande dificuldade na aplicação da modelagem paramétrica reside na contradição em tentar delimitar

propostas indeterminadas de projeto, principalmente considerando-se a fase de concepção formal, com uma ferramenta baseada em funções explícitas e em pensamento algorítmico.

2.3 ALGUMAS FORMAS GEOMÉTRICAS DE INTERESSE

Superfícies. Numa abordagem mais voltada para aplicação na computação gráfica, a superfície é uma extensão da definição de curva, para dois parâmetros: “t” que informa a posição da curva que se desloca no espaço em um determinado instante e “u” que informa as novas posições dos pontos internos à curva em movimento, o que ocasiona a mudança de forma (FAUX; PRATT, 1979, p. 89 apud POLONINI, 2014). Essa definição é descrita por equações que possuem dois parâmetros, que foram padronizados em “u” e “v”. Assim, de um modo geral, as superfícies são descritas por uma rede ou trama de curvas. Entre essas curvas se forma uma superfície quadrangular que é chamada de retalho (*patch*) que é análogo a um segmento de uma curva *spline* (MORTENSON, 1997, p. 149 apud POLONINI, 2014).

Superfícies curvilíneas. A forma externa é a característica mais visível do elemento construtivo. De um modo geral, essa forma é composta por superfícies e volumes de diferentes tamanhos e formatos. Uma forma curvilínea, foco específico deste trabalho acadêmico, pode ser representada graficamente por sólidos ou superfícies geométricas.

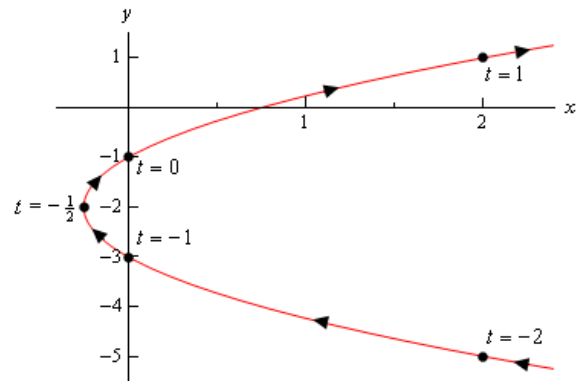
Equações paramétricas para representar formas geométricas. Conforme demonstra Polonini (2014, p.101), a representação paramétrica usa equações paramétricas para descrever, por exemplo, uma curva. Essas equações, em vez de definir uma relação direta entre as variáveis “x” e “y”, definem ambas em relação a uma terceira variável, chamada parâmetro. Elas são um conjunto de equações coordenadas que expressam um conjunto de quantidades como funções de um número de variáveis independentes (parâmetros). Assim como é possível

fazer um percurso de várias maneiras (mais rápida ou mais devagar, num sentido ou no outro, etc.) uma dada curva pode ter várias equações paramétricas. Pode-se ver um exemplo na Figura 2, para as equações paramétricas: $x = t^2 + t$ e $y = 2t - 1$:

FIGURA 2 – Exemplo de equação paramétrica e sua representação

t	x	y
-2	2	-5
-1	0	-3
$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{4}$	-2
0	0	-1
1	2	1

(a) valores das variáveis



(b) gráfico resultante com movimento do ponto

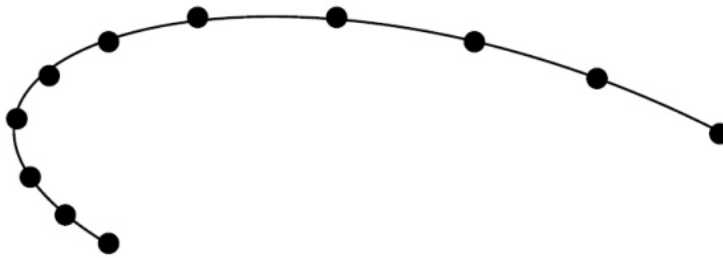
Fonte: DAWKINS, 2012 apud POLONINI, 2014.

Equações paramétricas têm muitas vantagens sobre outras formas de representação. Por exemplo, por serem funções em relação ao parâmetro independente, elas possuem propriedades independentes do sistema de coordenadas. Essa propriedade facilita a aplicação de transformações geométricas, de especial valor para o uso em ferramentas CAD. Outro aspecto importante é que para a forma paramétrica não há aumento de dificuldade entre a representação de curvas planas e espaciais. Por isso a forma paramétrica é a mais usada para a descrição de objetos na modelagem geométrica, principalmente usando o formato polinomial cúbico (BARSKY, DEROSE; 1984, p. 2; MARSH, 2005, p. 98 apud POLONINI, 2014). Isso porque, os polinômios facilitam a aplicação de métodos de análise, a exemplo da derivada e da integral, pois é a função de menor grau que possibilita a criação de curvas espaciais (FOLEY et al., 1990, p.479 apud POLONINI, 2014). As curvas paramétricas cúbicas são conhecidas no meio da computação gráfica, tais como: Hermite, Bézier, Splines, B-spline e NURBS.

Spline. Curva de forma livre, usada inicialmente para definir as formas de barcos, carros e aviões. Na modelagem geométrica sua forma é uma curva composta por meio de polinômios, com curvatura suave e contínua (SAXENA; SAHAY, 2005, p. 130 apud POLONINI, 2014). Para questões de modelagem de

curvas é interessante que o critério de uniformidade não seja atendido, pois possibilita maior controle da forma. Splines não uniformes possibilitam controle mais preciso de sua forma, especialmente nas partes de curvatura mais acentuada, que necessitam de mais segmentos para serem descritas (Figura 3).

FIGURA 3 – Exemplo de uma Spline não uniforme

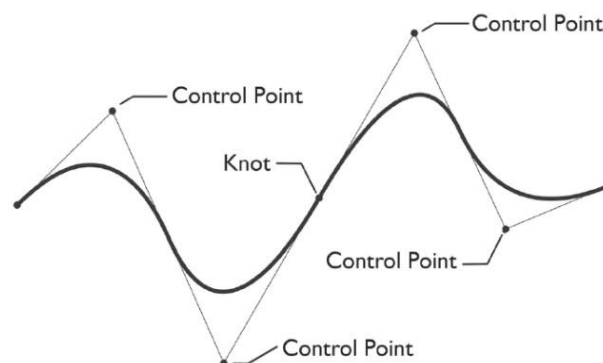


Fonte: AZEVEDO; CONCI, 2003, p. 76 apud POLONINI, 2014.

Dentre as várias categorias de splines, as mais usadas são a B-spline e a NURBS, mencionadas a seguir.

B-spline. A B-spline é a abreviação de Spline Base (*Basis spline*). A B-spline é composta de curvas Bézier, que funcionam como seus segmentos. O ponto final de um segmento é o ponto inicial para o segmento subsequente e seu encontro é chamado de nó (*knot*). A B-spline possibilita a definição do número de pontos de controle pelo usuário, que pode inseri-los ou retirá-los. A curva B-spline possui três tipos de elementos de manipulação da sua forma: o conjunto de pontos de controle, o conjunto de nós e o grau de curva (Figura 4).

FIGURA 4 – Exemplo de uma curva B-spline



Fonte: CABRINHA, 2005, p. 159 apud POLONINI, 2014.

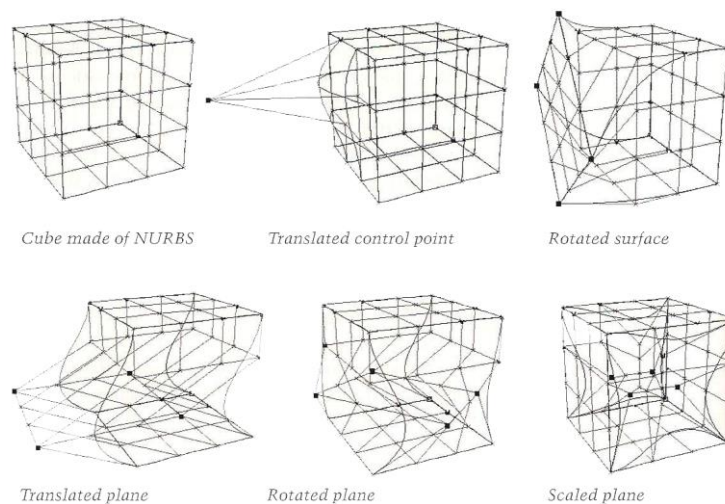
NURBS. A curva NURBS é uma generalização das B-Spline não racionais (PIEGL, 1991, p. 56 apud POLONINI, 2014) e por isso preserva as propriedades

dessas curvas. Portanto, oferece uma única forma matemática de representar precisamente tanto as formas tradicionais, como cônicas e quadráticas, quanto curvas e superfícies de formas livres, usadas em fuselagem de carros, de navios e aviões (PIEGL, 1991, p. 57 apud POLONINI, 2014).

Na manipulação da sua forma, a NURBS acrescenta um elemento, além dos pontos de controle e nó da B-spline: o “peso”. Esse elemento é um valor atribuído a cada ponto de controle que atua como uma espécie de força magnética que atrai ou repele uma determinada porção da curva em relação a esse ponto de controle. As alterações no peso irão mover um ponto da curva ao longo de uma linha reta através do seu ponto de controle correspondente (MORTENSON, 1997, p. 140 apud POLONINI, 2014).

Na NURBS pode-se definir o nível de continuidade na junção dos nós, possibilitando interpolar um ponto escolhido pelo usuário, sem que os segmentos da curva de cada lado do ponto de controle que foi interpolado se tornem linhas retas (FOLEY et al., 1990, p. 495 apud POLONINI, 2014). A forma racional torna as NURBS invariantes sobre transformações de projeção, de modo que essas operações podem ser aplicadas especificamente por seus pontos de controle (FOLEY et al., 1990, p. 504 apud POLONINI, 2014). Assim, as NURBS podem se utilizar das características da geometria projetiva, como as projeções ortogonais e perspectivas, diretamente (Figura 5).

Figura 5 – Manipulação de NURBS mediante transformações geométricas



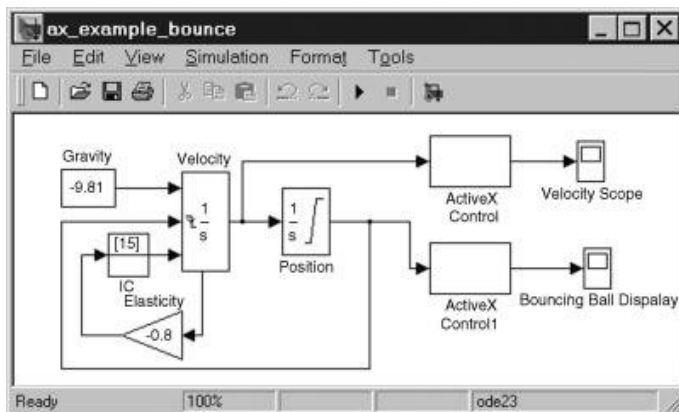
Fonte: MITCHELL; MCCULLOUGH, 1991, p. 196 apud POLONINI, 2014.

2.4 ALGORITMOS GENERATIVOS

O emprego de programação em ferramentas CAD é antigo e foi explorado por alguns arquitetos, mas teve pouco impacto até há pouco tempo devido ao alto nível de complexidade dos códigos, exigindo habilidades de programação especializadas (MCCULLOUGH, 2006, p. 13 apud POLONINI, 2014). Porém, essa situação mudou com novas linguagens de programação, especialmente, as linguagens visuais (Figura 6) que por serem uma interface gráfica podem facilitar a curva de aprendizagem de um projetista e por isso serem particularmente aplicáveis a ferramentas CAD.

O uso de programação visual na modelagem para arquitetura cresceu notadamente com a chegada do *Generative Components* da Bentley por volta de 2003 e, posteriormente, do *plug-in Grasshopper* para *Rhinoceros* da McNeel em 2007 (DAVIS; BURRY; BURRY, 2012 apud POLONINI, 2014).

FIGURA 6 – Duas diferentes notações de linguagem de programação



(a) linguagem visual

```

1 function P return INTEGER
2 begin
3   X, Y: INTEGER;
4   READ(X); READ(Y);
5   while (X > 10) loop
6     X := X - 10;
7     exit when X = 10;
8   end loop;
9   if (Y < 20 and then X mod 2 = 0) then
10    Y := Y + 20;
11  else
12    Y := Y - 20;
13  end if;
14  return 2 * X + Y;
15 end P;

```

(b) linguagem em texto

Fonte: WAH, 2008 apud POLONINI, 2014.

Algoritmos funcionam como se fossem receitas que mostram passo a passo os procedimentos necessários à resolução de uma tarefa. A função do algoritmo é apresentar a resposta de “como fazer”. Na modelagem paramétrica cabe aos algoritmos, por exemplo, a geração de geometrias, através da transformação dos dados e dos parâmetros em formas geométricas a serem utilizadas no projeto.

Esse tipo de algoritmo é chamado de algoritmo generativo, pois ele próprio gera as transformações dos dados e dos parâmetros. A transformação é possível após a leitura, manipulação e interpretação das variáveis inseridas.

Os parâmetros são valores e informações que interferem diretamente no resultado do processo. Constituem-se desde informações mais simples, como a quantidade utilizada de material, até equações complexas relacionadas à estrutura do modelo, dados climáticos, esforços atuantes na estrutura, comportamento dos usuários de um edifício, etc. Na arquitetura do sistema os parâmetros são capazes de codificar e quantificar variáveis. A modelagem paramétrica utiliza parâmetros e suas inter-relações para a definição de uma forma geométrica, onde o *design* do objeto é substituído pelo *design* do processo que gera o objeto.

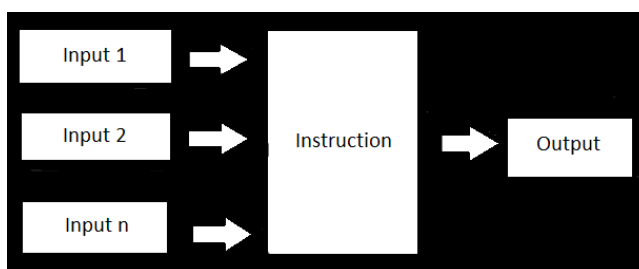
Plug-in Grasshopper. É um programa que utiliza linguagem de programação visual para construção de modelos paramétricos, implementado dentro do software Rhinoceros, portanto somente funciona no ambiente deste programa, utilizando seus recursos, e não independentemente. O Grasshopper (GH) possibilita ao usuário controlar, associar, otimizar e automatizar as operações de modelagem do Rhinoceros através da construção de um *script*. Assim, o GH produz conjuntos de instruções (*script*) de modelagem e não modelos geométricos em si, tanto que o *script* é armazenado em um arquivo específico do GH, chamado *Definition* - que é o fluxo de ações do programa, a sequência de *inputs* e *outputs*. As formas criadas pelo GH são visualizadas no ambiente do Rhinoceros, enquanto no GH somente se visualiza o *script* em si. Essas formas não podem ser manipuladas por ferramentas do Rhinoceros, uma vez que se configuram como uma imagem representativa do modelo criado pelo *script* do GH. A imagem não pode ser manipulada diretamente, mas apenas de forma indireta pela alteração das instruções de modelagem contidas no *script*. Essas modificações são realizadas automaticamente pelo GH, para cada manipulação do *script*. Uma vez terminada a manipulação dessa imagem, pode-se transformá-la em um modelo geométrico ao exportá-la do GH para o Rhinoceros. Usualmente, a elaboração de um *script* é realizada mediante um algoritmo e uma

linguagem de programação, que formalizam as ações a serem desenvolvidas de forma automática. Isto ocorre de maneira análoga no processo de modelagem através do GH.

Conforme Tedeschi (2011, p. 15 apud POLONINI, 2014), a abordagem algorítmica de modelagem (Figura 7) encara a construção de modelos geométricos como um algoritmo, ou seja, um problema que será resolvido através da especificação de uma sequência de instruções em etapas, a partir de uma entrada de dados inicial (*input*), de modo a gerar a forma como resultado, chamado de dados de saída (*output*).

Comumente, em outros *plug-ins*, essas instruções são descritas por intermédio de linguagem de programação em forma de texto numa interface baseada em linha de comando. De maneira diferente, o GH trabalha com uma interface em linguagem iconográfica, que representa uma versão gráfica desses algoritmos de maneira semelhante às linguagens de programação visual, que utilizam fluxogramas. Esse é um sistema de conexões (*links*) entre ícones que mostra a direção do fluxo das ações do *input* ao *output*. O encadeamento das ligações entre esses ícones representa a sequência de instruções de modelagem para se criar um modelo geométrico.

FIGURA 7 – Esquema de representação gráfica de um algoritmo



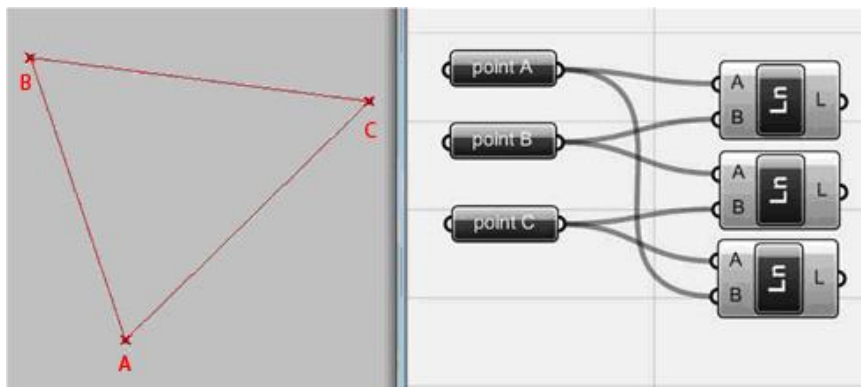
Fonte: TEDESCHI, 2011, p. 15 apud POLONINI, 2014.

No GH, esses ícones foram divididos em dois tipos de elementos: o componente e o parâmetro. O primeiro representa qualquer operação de modelagem, enquanto o segundo representa dados como dimensões, ângulos, raios ou objetos geométricos. Para demonstrar essa abordagem algorítmica na construção de um elemento geométrico, apresenta-se como exemplo a criação de um triângulo

qualquer. Para isso são necessários três pontos e três segmentos de reta. No GH, os pontos são os parâmetros ou *input*, pois contêm a informação inicial, que é a sua localização. Enquanto o segundo são componentes, pois são a operação de modelagem, ou seja, traçam o segmento de reta entre dois pontos escolhidos. Assim, para modelar um triângulo no GH, o primeiro passo é selecionar o ícone do comando ponto e criar três pontos, A, B e C (Figura 8)

O segundo passo é criar o segmento de reta entre os pontos A e B, ao se ligar o parâmetro ponto com o componente “linha” (Ln), que é a operação de desenhar o segmento de reta. Em seguida repete-se a mesma ação para criar os demais segmentos de reta.

FIGURA 8 – Modelagem de um triângulo no Rhinoceros - Grasshopper



Fonte: KHABAZI, 2009 apud POLONINI, 2014.

Segundo Polonini (2014, p. 192 - 200):

Uma vez que um *definition* é criado no GH para construir um tipo de objeto, o mesmo pode ser usado para construir diferentes objetos do mesmo tipo, através da alteração da entrada de dados inicial, pois cada *input* diferente resulta em um *output* distinto. Por exemplo, se fossem alterados os pontos iniciais no *definition* usado na criação do triângulo da Figura 8, seria construído um triângulo diferente. Além da geração de formas geométricas, o GH pode articular um ou vários elementos geométricos entre si, através de um conjunto de regras que regulam o comportamento e as interações dos elementos que compõem o modelo. Por exemplo, usando-se de funções lógicas e operações de manipulação de dados. Tal procedimento, de um modo geral, organiza os elementos do modelo em sistemas ou hierarquias. Em cada nível ou etapa desse arranjo, um ou mais atributos destes elementos são definidos para se tornarem um dos parâmetros (*input*) de outros elementos do nível seguinte, e assim sucessivamente para produzir um objeto formado por elementos geométricos associados entre si.

O Grasshopper disponibiliza ao usuário uma gama de parâmetros e componentes. Os componentes foram organizados, pelo desenvolvedor do GH, em oito categorias, cada uma com um número variado de operações de modelagem, que totalizam quatrocentos e sessenta comandos, aproximadamente. Uma síntese dessas categorias e suas subcategorias pode ser vista na Tabela 1.

Os componentes do GH podem ser considerados parametrizados, pois possuem o *input* em aberto. Os parâmetros das formas são declarados, à medida que o usuário pode criar relações entre parâmetros diferentes, mediante as ligações entre os componentes (ícones do *definition*) ou as operações de manipulação de dados. Por sua vez, essas relações entre os parâmetros, e por analogia entre as formas, podem ser apontadas como restrições (*constraints*). Pelo emprego dessas restrições pode-se descrever relações semânticas entre as formas, ou seja, criar comportamento inteligente. Além disso, como um único *definition* pode ser usado para construir diferentes objetos do mesmo tipo (instância) ao se alterar a entrada de dados inicial, pode-se considerar um *definition* como um meta-modelo de uma classe ou família específica de objetos. Consequentemente, isso indica a capacidade do GH de gerar variações paramétricas. Por todos esses aspectos, o GH pode ser enquadrado como uma ferramenta de modelagem paramétrica.

TABELA 1 – SÍNTESE DA GAMA DE COMPONENTES DO GRASSHOPPER

CATEGORIAS	SUBCATEGORIAS	CATEGORIAS	SUBCATEGORIAS
Funções matemáticas e funções lógicas	Operações Booleanas	Superfícies	Análises
	Domínio de função		Free-form
	Operações		Primitivas
	Polinômios		Utilidades
	Script	Mesh	Primitivas
	Trigonometria		Triangulação
	Utilidades		Utilidades
Curvas	Análises	Interseções	Matemática
	Divisões		Física
	Primitivas		Região
	Spline		Forma
	Utilidades	Transformações	Afins
Vetores	Cores		Euclidianas
	Malha (grid)		Morph
	Planos	Utilidades	
	Pontos	Listas	
	Vetores	Operações de manipulação de dados	Sequências numéricas
	Conjuntos		
	Strings		
	Árvore de dados		

Fonte: Adaptado de POLONINI, 2014.

2.5 CONEXÃO ENTRE MODELAGEM PARAMÉTRICA E BIM

A modelagem paramétrica se encontra na base do *Integrated Compound Model*, definido por Oxman (2006 apud POLONINI, 2014) como a combinação entre os modelos anteriores em um processo de projeto integrado, com o fluxo de dados e de informações em múltiplas direções. Pode-se considerar a Modelagem de Informação da Construção (*Building Information Modeling - BIM*), como pertencente ao *Integrated Compound Model*, pois uma das metas do BIM é definir um processo de projeto integrado entre as diferentes disciplinas da indústria de AEC, suportando as diferentes fases do projeto e da construção da edificação.

Ferramentas BIM têm integrado a modelagem paramétrica, tornando inteligente o comportamento de objetos pertencentes a área de AEC pela manutenção das relações geométricas associativas criadas nas ferramentas de modelagem paramétrica quando inseridas no ambiente BIM. A modelagem com informação da construção emprega sistemas de modelagem paramétrica que atribuem não apenas informações geométricas aos seus meta-modelos, mas também informações físicas de materiais construtivos, de modo a simular o seu comportamento. Segundo Eastman (2014), o BIM baseia-se em objetos paramétricos, onde:

- Os objetos possuem dados e regras associados. Por exemplo, as regras paramétricas dos objetos modificam automaticamente suas geometrias (comprimento, diâmetro, área, volume, etc.) e outras características (tais como: peso, resistência);
- Os objetos podem ser definidos em diferentes níveis de agregação e vinculam-se a um conjunto de atributos, tais como materiais, fornecedor, consumo de energia, etc.

Em meados da década de 90, técnicas de simulação computacional, principalmente os modelos de fenômenos físicos, foram incorporadas e combinadas com a modelagem de sólidos de modo a aperfeiçoar as ferramentas CAD para área de AEC. Essas ferramentas permitiam simulações numéricas do desempenho de obras arquitetônicas e de engenharia, nas fases de desenvolvimento do projeto.

Como exemplo, duas técnicas de simulação apresentam possibilidade de agregar mais informações ao modelo BIM: a *Finite Element Method* (FEM) e a *Computational Fluid Dynamics* (CFD). A primeira é usada para calcular e analisar esforços estruturais por meio da subdivisão do modelo geométrico, por exemplo, de um edifício, em uma malha composta de elementos e nós (SCHODEK et al., 2005, p. 217 apud POLONINI, 2014), identificando áreas críticas. A segunda, CFD, pode ser usada, por exemplo, para avaliar os fluxos de ar no entorno e dentro do edifício. O programa de simulação é alimentado com informações do entorno e da atividade do

edifício para computar além da dinâmica dos fluxos (de ar, fumaça, água...), as transferências de calor entre o revestimento e o ambiente, e as reações químicas como combustão (KOLAREVIC, 2003, p. 25 apud POLONINI, 2014).

O BIM pode ainda servir para a exploração de protocolos orientadores para a transferência de informações da forma criada para os sistemas de fabricação digital, outro aspecto digno de destaque. Conforme PUPO (2009, p. 102 apud POLONINI, 2014), a fabricação digital utiliza-se das tecnologias de controle numérico computadorizado (CNC), transferindo dados da modelagem geométrica 3D de um programa de fabricação auxiliada por computador (*Computer Aided Manufacture – CAM*) para fabricação direta em máquina CNC. Segundo PUPO (2009, p. 102 apud POLONINI, 2014), [...] a fabricação digital permite resultados variáveis e não repetitivos. Induz ao conceito de customização em massa, permitindo o desenvolvimento de sistemas construtivos não padronizados através de diferenciações seriais e variações digitalmente controladas. Suas aplicações na arquitetura e construção são as mais variadas, desde a produção de fôrmas para concreto armado com formas especiais até a produção de ornamentos esculpidos em pedra que podem ser utilizados como “próteses” arquitetônicas em obras de restauro.

3 METODOLOGIA

3.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Delimitação espacial:	Gestão de projetos de usinas hidrelétricas Projeto de estruturas de casas de força Turbinas tipo Francis de eixo vertical
Delimitação populacional:	Empresas geradoras de energia que usem a energia hidráulica como fonte para produção de energia elétrica. Foram utilizados dados de apenas uma empresa – a Copel Geração e Transmissão S.A., concessionária de

energia do estado do Paraná.

Delimitação temporal: Estudos realizados nas duas últimas décadas pela empresa pesquisada, mais precisamente entre os anos 2000 e 2018.

3.2 LINHA DE PESQUISA

A linha de pesquisa tem ênfase na sua aplicação prática, baseada na compreensão dos processos de modelagem da informação da construção, conforme etapas descritas a seguir:

1. **Construção de referencial teórico.** Associação de práticas de modelagem de turbinas hidráulicas adotadas em estudos de viabilidade de usinas hidrelétricas, com vistas à compreensão do contexto e identificação dos níveis de produtividade em processos de modelagem de casas de força. Técnica: pesquisa bibliográfica exploratória. Fonte: artigos científicos, monografias, dissertações, livros técnicos. Dados: conceitos, breve abordagem histórica e discussões sobre o assunto relativas às características deste tipo de projeto;
2. **Seleção do objeto de estudo.** Definição do tipo de turbina a modelar. Técnica: pesquisa exploratória preliminar mediante diálogo com profissionais do setor de produção de energia. Fonte: Copel Geração e Transmissão S.A. Dados: respostas de questionário preliminar aplicado a profissionais do setor para identificar características de interesse no processo convencional de gerenciamento de projetos de usinas hidrelétricas;
3. **Levantamento de dados.** Apropriação de mão-de-obra de modelagem. Técnica: pesquisa descritiva preliminar mediante diálogo com profissionais do setor de produção de energia. Fonte: Copel Geração e Transmissão S.A. Dados: respostas de questionário específico aplicado a profissionais do setor para identificar dificuldades e oportunidades de

melhoria no processo convencional, assim como para levantar variáveis e dados de uso de mão-de-obra na seleção e modelagem de turbinas;

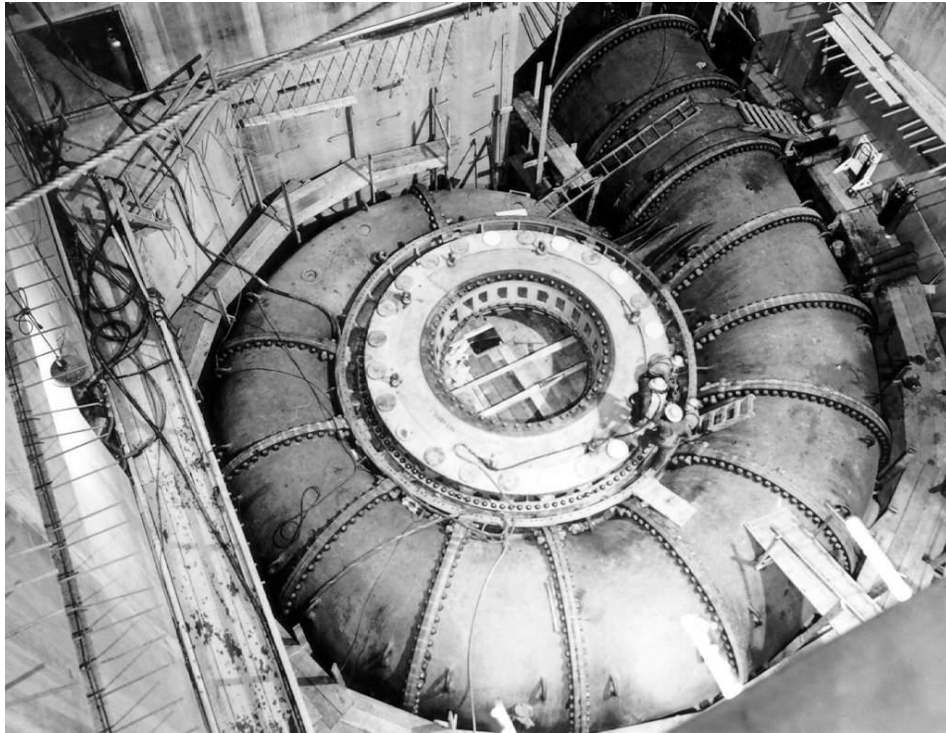
4. **Desenvolvimento e descrição da modelagem.** Desenvolvimento e descrição do processo de modelagem da turbina escolhida, com uso de BIM e algoritmos generativos. Técnica: pesquisa analítica, incluindo seleção de softwares a utilizar, estudo para compreender funções e comandos dos softwares necessários, prática de modelagem e parametrização com base nas aulas ministradas no curso de pós-graduação, associação com eventos de interferência entre variáveis e sua aplicação ao objeto de estudo;
5. **Comparação com o processo convencional.** Apresentação dos resultados comparativos entre processos de gerenciamento sem e com BIM. Técnica: pesquisa analítica baseada nos resultados e discussões com profissionais que exercem ou exerceram funções de projeto e gerenciamento de projeto de usinas hidrelétricas sem uso de BIM;
6. **Análise de valor agregado.** Diagnóstico sobre o valor agregado ao processo de gerenciamento de projeto de usinas hidrelétricas devido ao uso do BIM. Técnica: pesquisa analítica qualitativa, com base na comparação dos resultados e depoimentos dos profissionais consultados.

3.3 SELEÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

Seleção dos elementos de modelagem: turbinas. Para escolha do objeto de estudo foram relacionados os tipos principais de turbinas hidráulicas, observou-se o histórico de utilização no Brasil e a matriz de novos aproveitamentos energéticos em estudo no estado do Paraná. Nesse cenário as turbinas utilizadas ou em estudo dividem-se predominantemente em quatro tipos principais: Pelton, Francis, Kaplan e Bulbo. Escolheu-se a turbina do tipo Francis de eixo vertical para a modelagem (Figuras 9 a 11), por ser o tipo de maior potencial de utilização no Brasil

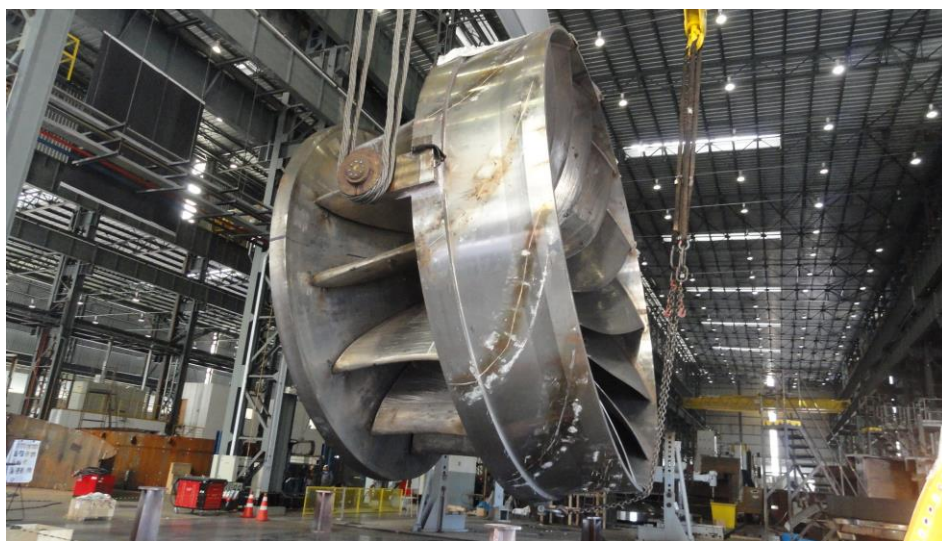
e em usinas que estão sendo analisadas na concessionária de energia paranaense – a Copel Geração e Transmissão S.A.

FIGURA 9 - CAIXA ESPIRAL DE UMA TURBINA TIPO FRANCIS DE EIXO VERTICAL

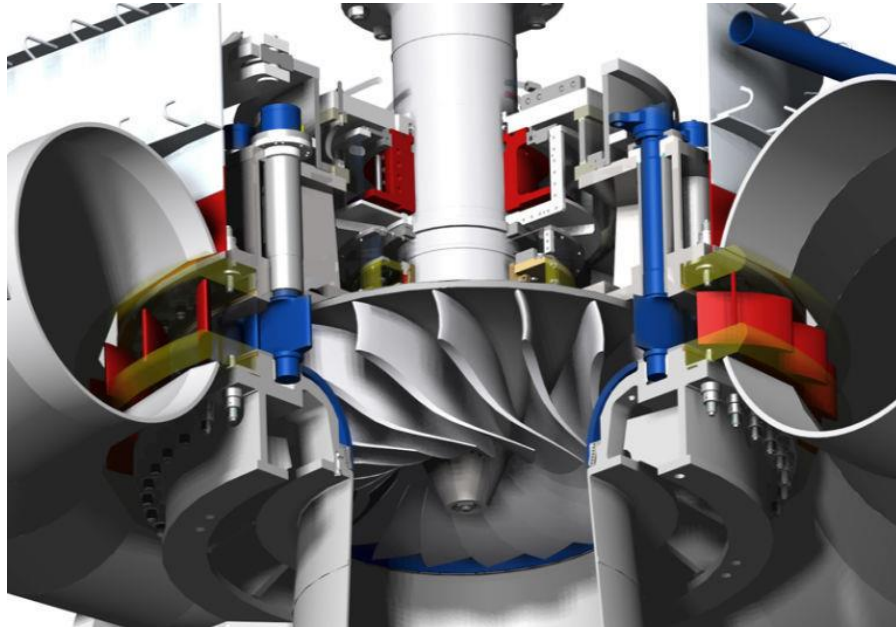


Fonte: Usina Hidrelétrica Grand Coulee, USA.
http://www.wikiwand.com/pt/Turbina_Francis

FIGURA 10 - ROTOR DE UMA TURBINA TIPO FRANCIS



Fonte: Usina Hidrelétrica de Belo Monte, Brasil
<http://nailharga.blogspot.com/2015/01/um-gigante-de-aco-nos-caminhos-da.html>

FIGURA 11 - CORTE ESQUEMÁTICO EM 3D DE UMA TURBINA TIPO FRANCIS DE EIXO VERTICAL

Fonte: Indústrias Voith
<http://www.directindustry.com/pt/prod/voith-gmbh-co-kgaa/product-39449-1997279.html>

Seleção dos softwares para a modelagem. Como orientação geral para seleção do programa de modelagem BIM foram considerados os critérios recomendados pela AsBEA-RS. Dentre os programas Revit, VectorWorks, AECOsim Building Designer e ARCHICAD, escolheu-se o ARCHICAD devido à boa interface, acesso a uma licença educacional gratuita e pela ótima integração entre suas funções, além do atendimento dos requisitos de certificação BIM pela Building Smart, comum a todos os programas mencionados.

Foram analisados alguns dos *softwares* de algoritmos generativos de linguagem gráfica mais conhecidos no mercado – Dynamo, Marionette, Generative Components e Grasshopper, optando-se pelo Grasshopper, que é um *plug-in* do Rhinceros, devido à sua interface mais “amigável”, boa integração com o ARCHICAD e pelo desenvolvedor oferecer acesso a uma licença demonstrativa de uso por noventa dias, sem custo. O *software* Rhinceros possui uma característica particularmente útil ao objeto em estudo, que é o fato de trabalhar com NURBS, conferindo maior precisão ao modelo.

Seleção dos parâmetros de modelagem. As principais variáveis utilizadas na seleção do tipo de turbinas hidráulicas para aproveitamentos de

geração foram os parâmetros iniciais escolhidos para serem geridos pelos algoritmos no Grasshopper, dinamicamente ligados à geometria modelada no *software* Rhinoceros: potência da usina, número de unidades geradoras, níveis d'água de montante e de jusante, vazão máxima turbinada, rotação síncrona, pressão admissível, proporções recomendadas para obtenção de maior eficiência na geração de energia, restrições técnicas de projeto (inclinações, excentricidades, espaços necessários à instalação, operação e manutenção).

3.4 MODELAGEM DO OBJETO DE ESTUDO

Numa descrição resumida, a geometria da caixa espiral de uma turbina do tipo Francis e seu tubo de sucção foram modelados com uso de algoritmos generativos no *plug-in* Grasshopper, com base nos Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas e nas Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas da Eletrobrás, e nas dimensões aproximadas e proporções ótimas para caixas espirais e tubos de sucção preconizadas pela monografia de engenharia intitulada *Selecting Hydraulic Reaction Turbines* publicada pelo Departamento do Interior dos Estados Unidos.

Dividiu-se a potência da usina pelo número de unidades geradoras (no caso deste trabalho, três unidades) para determinar a potência da turbina. Modelou-se uma unidade com diâmetro do pré-distribuidor (D_s) igual a um metro. O modelo gerado foi escalado ao final do processo, pelo diâmetro calculado pelo algoritmo ($D_s=2,13\text{m}$), e o módulo todo foi replicado pelo número de unidades. As unidades geradoras foram espaçadas entre si por uma distância suficiente para as operações de montagem e manutenção. Tal conjunto, acrescido do envolvimento da caixa espiral e tubo de sucção pela estrutura de concreto, mais os espaços de circulação necessários à operação e manutenção em volta dos equipamentos, indica o tamanho necessário à Casa de Força.

O modelo assim gerado foi integrado ao software BIM ARCHICAD⁷, através de um plug-in disponibilizado pela Graphisoft que estabelece uma conexão bilateral e em tempo real com o Grasshopper.

Conforme mencionado, o objetivo do uso de algoritmos com BIM é reduzir o tempo de modelagem e de análise das alternativas técnicas a estudar, decorrente de variações na geometria ou mudanças de concepção, em relação a processos de projeto sem BIM. Além do desenho, incluem-se aqui, por exemplo, as correspondentes alterações na quantificação de materiais para aferir o orçamento do empreendimento. Salienta-se que, além da geometria, são agregadas informações aos elementos gráficos, tais como especificação dos materiais e no processo com BIM as quantidades são calculadas e tabuladas pelo software BIM ou pelos algoritmos.

Portanto, neste trabalho os algoritmos foram elaborados de modo a deixar o usuário manipular as principais variáveis. Assim, ao mudar os seus valores, o algoritmo atualizará automaticamente o modelo. Isso significa que as atividades de remodelar manualmente as variações, como é necessário no processo convencional, ficam dispensadas, poupando um tempo realmente enorme.

Passa-se a seguir a detalhar o processo desenvolvido.

a. Seleção dos parâmetros e das relações do meta-modelo

O porte de uma usina, basicamente, é caracterizado pela potência a ser gerada. Para a modelagem inicial simulou-se uma instalação de pequeno porte, com potência de 47 MW [P_{uh}]. A potência dividida pelo número de unidades geradoras [n_{ug}] é a potência da turbina [P_d].

Dos parâmetros de entrada necessários à seleção das turbinas destaca-se também os níveis da água à montante e jusante [N_m], [N_j], que definem a queda d'água [H_d], a vazão máxima turbinada [Q] e a submergência [S]. Esta última é a distância vertical mínima admissível entre o nível d'água no canal de restituição e a linha de centro do equipamento, para que a geração não seja reduzida.

⁷ Certificado como software BIM pela BuildingSmart.

Complementando este conjunto de parâmetros primários está a rotação síncrona $[n]$ que, juntamente com as demais variáveis, permite calcular a velocidade específica da turbina $[n_s]$.

As relações do meta-modelo ficam subordinadas às equações que determinam os parâmetros secundários, tais como pressão $[p]$, velocidade $[v]$ e o diâmetro do pré-distribuidor $[D_s]$. Praticamente toda a geometria da caixa espiral e do tubo de sucção foi construída em função dessas variáveis. Por exemplo, a própria excentricidade $[e_y]$ do tubo de sucção, assim como o espaçamento entre as unidades de geração, a serem medidas no eixo y do sistema de coordenadas cartesianas, para efeito desta modelagem, são proporcionais a D_s .

A pressão e a velocidade da água dentro dos condutos determinam o ponto de transição entre os materiais estruturais, mormente aço e concreto, assim como as espessuras desses materiais⁸ e o comprimento dessas estruturas, como por exemplo a extensão do tubo de sucção $[L_{f\ TS}]$. As proporções geométricas objetivam a obtenção da máxima eficiência na produção de energia, redução de efeitos nocivos⁹ aos materiais que oferecem sustentação estrutural, redução de perdas hidráulicas e assim por diante. As inclinações dos ramos do tubo de sucção $[i_{inf\ TS}]$, $[i_{sup\ TS}]$, em relação à horizontal, foram limitadas a faixas recomendadas tecnicamente (*slope* máximo na face inferior do *draft tube* 1:6).

No algoritmo representou-se a maioria destes parâmetros por *Number Sliders*, que podem ser facilmente manipulados pelo usuário¹⁰. *Panels* em cor amarela mostram resultados de algumas operações matemáticas ou *inputs* fixos. Os demais ícones representam componentes que executam cálculos obedecendo as equações definidas, comandos de comportamentos geométricos ou códigos de

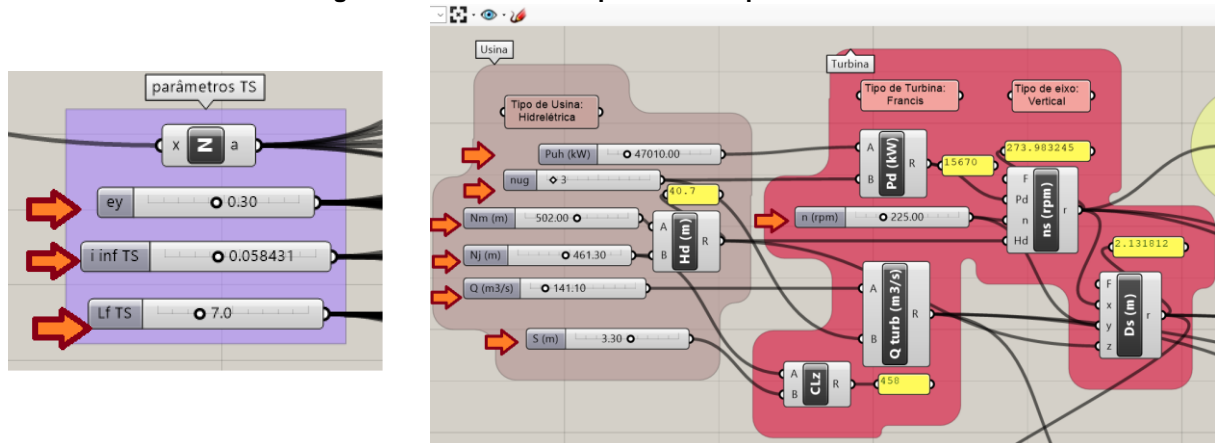
⁸ A pressão normal estática ao longo dos condutos sofre variações decorrentes do golpe de aríete quando há mudanças súbitas de vazão, resultantes de fechamentos ou aberturas rápidas, parciais ou totais, do dispositivo de fechamento da turbina. Essas variações, positivas ou negativas, conforme o engolimento da turbina diminua ou aumente repentinamente, condicionam a espessura da chapa do conduto. Essas variações são estimadas pelo Método de Allievi.

⁹ Cavitação, por exemplo.

¹⁰ Basta clicar sobre o parâmetro com o mouse, segurar e arrastá-lo para a direita ou esquerda (por isso o nome *number slider*), ou digitar o novo valor que se deseja após um clique duplo do mouse. O modelo será automaticamente atualizado pelos algoritmos.

programação escritos em linguagem Python (fig. 12).

FIGURA 12 – Algumas das variáveis representadas por number sliders



Fonte: Algoritmo desenvolvido pelo autor deste trabalho utilizando o plug-in Grasshopper

b. Equações das principais variáveis

O método aqui expresso, embora siga em linhas gerais critérios técnicos consagrados, representa uma enorme simplificação dos fenômenos e seus efeitos neste tipo de instalação, sendo válido, portanto, apenas para simular estudos preliminares no intento deste trabalho acadêmico, estudos estes que obviamente necessitarão ser bastante aprofundados ao longo do processo de projeto.

$$n_s = n \cdot P_d^{1/2} / H_d^{5/4}$$

$$D_s = 84.47 \cdot 0.0211 \cdot n_s^{2/3} \cdot H_d^{1/2} / n$$

A vazão de cada turbina [Q_{turb}] é a vazão máxima turbinada da usina [Q] dividida pelo número de unidades de geração [n_{ug}]. A velocidade [v], estimada pela equação da continuidade, é a razão entre a vazão da turbina [Q_{turb}] e a área de cada secção dos condutos. Deve-se verificar se a velocidade máxima admissível para cada tipo de tubulação é atendida (tab. 2). O atendimento desta condição determina a secção do modelo onde haverá a transição de um tipo de material para outro, a qual também foi modelada de modo dinâmico no algoritmo.

O ponto de transição do aço para outro material mais barato, tal como o concreto, depende da velocidade do fluido, que por sua vez depende da geometria e das perdas de carga produzidas no circuito.

TABELA 2 – Velocidade [v] conforme o material

Material	v (m/s)
Aço	5,0
Concreto	3,0

Fonte: Diretrizes da ELETROBRAS para estudos e projetos de pequenas centrais hidrelétricas

As pressões [p] e tensões admissíveis [S_{adm}] seguem o código internacional ASME *Boiler and Pressure Vessel Code*, da Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos. Para o caso em estudo, calculadas segundo o código ASME seção VIII divisão I, obteve-se $p = 1,7$ Mpa e $S_{adm} = 138,5$ Mpa, considerando as tensões limite de escoamento e tração para aço ASTM A516. O mesmo código identifica a eficiência das juntas soldadas a ser considerada [E_{fSold}], no caso $E_{fSold} = 1000$, e o procedimento de cálculo para as espessuras nos pontos críticos [t_1], [t_2]. Foram utilizados algoritmos do tipo *for evaluate* para cálculo das espessuras (fig. 13), e as seguintes equações:

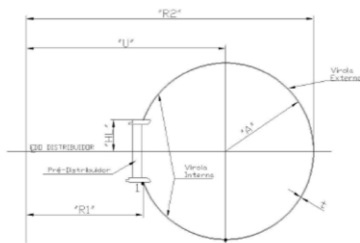
$$t_{2 \min} = p \cdot R_{int} \cdot 1000 / (S_{adm} \cdot E_{fSold} - 0.6 \cdot p)$$

$$t_{1 \min} = p \cdot R_{int} \cdot (U + R_1) \cdot 1000 / (2 \cdot R_1 \cdot (S_{adm} \cdot E_{fSold} - 0.6 \cdot p))$$

FIGURA 13 – Cálculo das espessuras [$t_{1 \min}$], [$t_{2 \min}$] do aço para a caixa espiral

O cálculo da espessura das virolas da caixa espiral é efetuado em dois pontos distintos (1 e 2) em cada seção, conforme mostrado abaixo:

Tal critério consiste basicamente em:

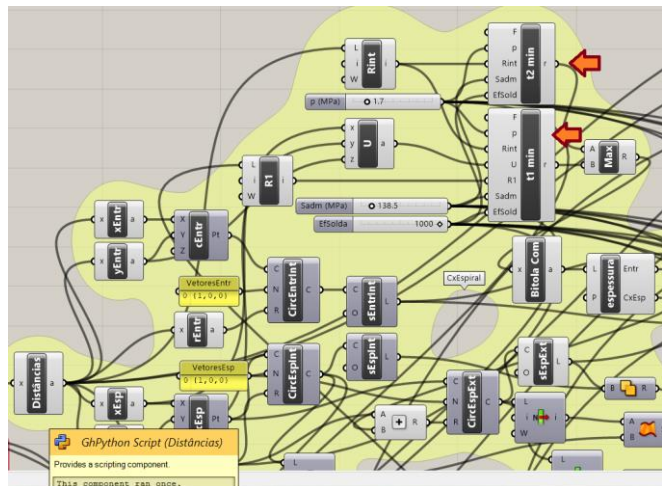


Ponto 1: Ligação da caixa espiral com o pré-distribuidor

$$t_{1 \min} = \frac{p \times A \times (U + R_1)}{2 \times R_1 \times (S \times E - 0.6 \times p)} \times 1000 \quad (2)$$

Ponto 2: Virola externa

$$t_{2 \min} = \frac{p \times A}{(S \times E - 0.6 \times p)} \times 1000 \quad (3)$$



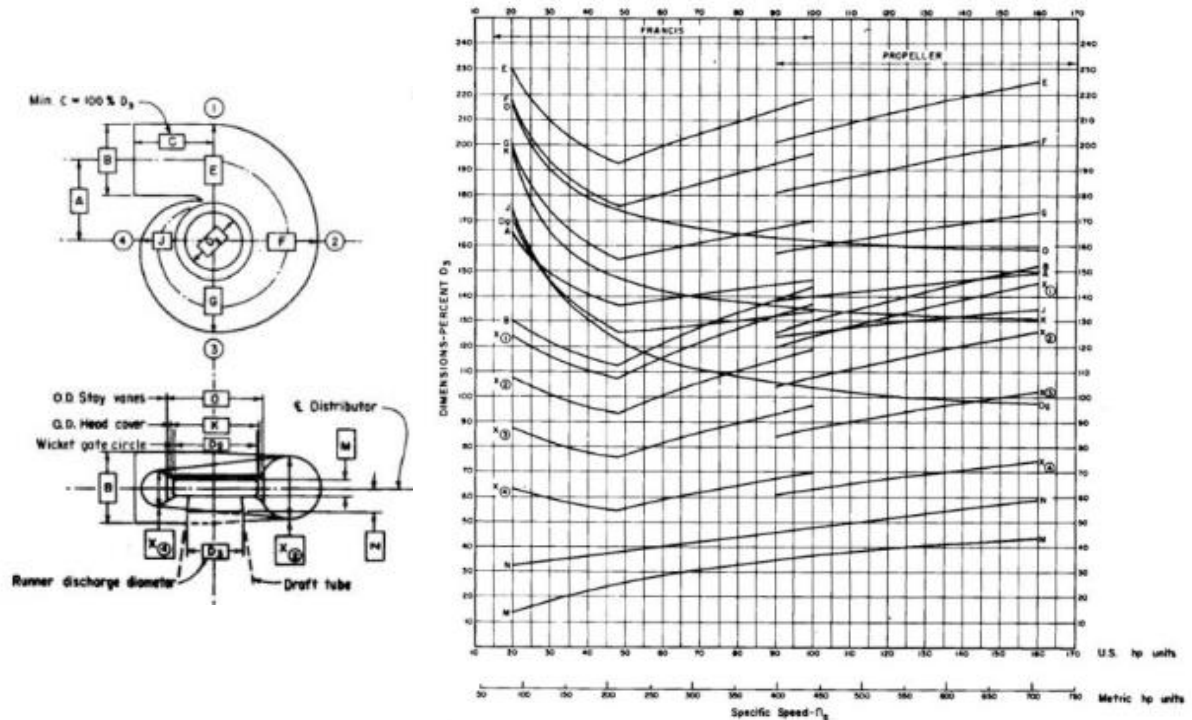
Fonte: (à esquerda): Departamento de Engenharia Eletromecânica da COPEL Geração e Transmissão S.A
(à direita): Algoritmo desenvolvido pelo autor deste trabalho utilizando o plug-in Grasshopper

Para o tubo de sucção as equações para determinar as espessuras do aço são similares, com a diferença de que, como a sessão é constituída basicamente por retângulos arredondados nos cantos (*fillets*), utiliza-se um raio equivalente [R_{eq}] em função do perímetro de cada seção:

$$t_{\min} = p \cdot (L - 4 \cdot (R_{\text{fillet1}} + R_{\text{fillet2}}) + \pi \cdot (R_{\text{fillet1}} + R_{\text{fillet2}})) \cdot 1000 / (2 \cdot \pi \cdot (S_{\text{adm}} \cdot E_{\text{fSold}} - 0.6 \cdot p))$$

O gráfico a seguir (fig. 14) indica proporções em função do diâmetro do pré-distribuidor e da velocidade específica da turbina [n_s].

FIGURA 14 – Proporções básicas para caixa espiral, recomendadas para turbinas Francis



Fonte: Selecting Reaction Hydraulic Turbines – United States Department of the Interior, p.25

Para cada curva representativa das variáveis identificou-se as abcissas correspondentes e para cada variável encontrou-se a regressão polinomial que a define com precisão de duas casas decimais. O resultado foi escrito em componentes do tipo *PythonScript* do GH, conforme intervalos aplicáveis:

Para $209.56 < n_s \leq 441.18$:

$$A = 1.39449 - 9.10988 \cdot \text{pow}(10, -4) \cdot x + 4.64667 \cdot \text{pow}(10, -6) \cdot x^{**2} - 5.03908 \cdot \text{pow}(10, -9) \cdot x^{**3}$$

$$Dg = (1.49963 - 0.0032 \cdot x + 1.45847 \cdot \text{pow}(10, -5) \cdot x^{**2} - 2.68944 \cdot \text{pow}(10, -8) \cdot x^{**3} + 1.92954 \cdot \text{pow}(10, -11) \cdot x^{**4} - 4.90039 \cdot \text{pow}(10, -16) \cdot x^{**5}) / 2$$

$$E = 1.92123 - 0.0021 \cdot x + 1.60161 \cdot \text{pow}(10, -5) \cdot x^{**2} - 3.29424 \cdot \text{pow}(10, -8) \cdot x^{**3} + 2.38533 \cdot \text{pow}(10, -11) \cdot x^{**4}$$

$$F = 1.64254 + 2.0621 \cdot \text{pow}(10, -4) \cdot x + 2.06289 \cdot \text{pow}(10, -6) \cdot x^{**2} - 1.98467 \cdot \text{pow}(10, -9) \cdot x^{**3}$$

$$G = (1.41058 + 6.34281 \cdot \text{pow}(10, -4) \cdot x + 4.95953 \cdot \text{pow}(10, -8) \cdot x^{**2})$$

$$K = (3.96449 - 0.03952 \cdot x + 2.57848 \cdot \text{pow}(10, -4) \cdot x^{**2} - 8.57077 \cdot \text{pow}(10, -7) \cdot x^{**3} + 1.41596 \cdot \text{pow}(10, -9) \cdot x^{**4} - 9.22353 \cdot \text{pow}(10, -13) \cdot x^{**5}) / 2$$

$$x1 = (0.67001 + 0.00221 \cdot x - 1.44176 \cdot \text{pow}(10, -6) \cdot x^{**2}) / 2$$

$$x2 = (0.59781 + 0.00185 \cdot x - 1.18414 \cdot \text{pow}(10, -6) \cdot x^{**2}) / 2$$

$$x3 = (0.47817 + 0.00151 \cdot x - 9.32569 \cdot \text{pow}(10, -7) \cdot x^{**2}) / 2$$

$$x4 = (0.34828 + 0.00108 \cdot x - 6.65648 \cdot \text{pow}(10, -7) \cdot x^{**2}) / 2$$

Para $83.28 < n_s \leq 209.56$:

$$\begin{aligned}
 A &= 2.97909 - 0.029 * x + 2.20366 * \text{math.pow}(10, -4) * x^{**2} - 7.96633 * \text{math.pow}(10, -7) * x^{**3} + 1.09592 * \text{math.pow}(10, -9) * x^{**4} \\
 E &= 3.13064 - 0.01366 * x + 5.55668 * \text{math.pow}(10, -5) * x^{**2} - 8.45818 * \text{math.pow}(10, -8) * x^{**3} \\
 Dg &= (4.91664 - 0.08982 * x + 0.00101 * x^{**2} - 6.01842 * \text{math.pow}(10, -6) * x^{**3} + 1.81678 * \text{math.pow}(10, -8) * x^{**4} - 2.19569 * \text{math.pow}(10, -11) * x^{**5}) / 2 \\
 F &= 3.37493 - 0.02094 * x + 9.8596 * \text{math.pow}(10, -5) * x^{**2} - 1.69495 * \text{math.pow}(10, -7) * x^{**3} \\
 G &= (4.53996 - 0.059 * x + 4.91878 * \text{math.pow}(10, -4) * x^{**2} - 1.94616 * \text{math.pow}(10, -6) * x^{**3} + 2.94576 * \text{math.pow}(10, -9) * x^{**4}) \\
 K &= (3.96449 - 0.03952 * x + 2.57848 * \text{math.pow}(10, -4) * x^{**2} - 8.57077 * \text{math.pow}(10, -7) * x^{**3} + 1.41596 * \text{math.pow}(10, -9) * x^{**4} - 9.22353 * \text{math.pow}(10, -13) * x^{**5}) / 2 \\
 x1 &= (1.54298 - 0.0049 * x + 1.95013 * \text{math.pow}(10, -5) * x^{**2} - 3.2928 * \text{math.pow}(10, -8) * x^{**3}) / 2 \\
 x2 &= (1.22887 - 0.00177 * x - 7.06307 * \text{math.pow}(10, -7) * x^{**2} + 1.17944 * \text{math.pow}(10, -8) * x^{**3}) / 2 \\
 x3 &= (0.98885 - 0.00113 * x - 3.22932 * \text{math.pow}(10, -6) * x^{**2} + 1.574 * \text{math.pow}(10, -8) * x^{**3}) / 2 \\
 x4 &= (-0.70856 + 0.05119 * x - 7.40769 * \text{math.pow}(10, -4) * x^{**2} + 5.12685 * \text{math.pow}(10, -6) * x^{**3} - 1.73379 * \text{math.pow}(10, -8) * x^{**4} + 2.30439 * \text{math.pow}(10, -11) * x^{**5}) / 2
 \end{aligned}$$

Para $83.28 < n_s \leq 441.18$:

$$\begin{aligned}
 J &= (2.83626 - 0.0182 * x + 7.72002 * \text{math.pow}(10, -5) * x^{**2} - 1.53424 * \text{math.pow}(10, -7) * x^{**3} + 1.15644 * \text{math.pow}(10, -10) * x^{**4}) \\
 M &= (0.01469 + 0.00169 * x - 3.78865 * \text{math.pow}(10, -6) * x^{**2} + 6.01628 * \text{math.pow}(10, -9) * x^{**3} - 4.67599 * \text{math.pow}(10, -12) * x^{**4}) / 2 \\
 N &= (0.20986 + 0.00248 * x - 1.96998 * \text{math.pow}(10, -5) * x^{**2} + 8.52215 * \text{math.pow}(10, -8) * x^{**3} - 1.68383 * \text{math.pow}(10, -10) * x^{**4} + 1.23411 * \text{math.pow}(10, -13) * x^{**5}) * (-1) \\
 O &= (3.74696 - 0.03144 * x + 2.04495 * \text{math.pow}(10, -4) * x^{**2} - 6.81673 * \text{math.pow}(10, -7) * x^{**3} + 1.12852 * \text{math.pow}(10, -9) * x^{**4} - 7.34553 * \text{math.pow}(10, -13) * x^{**5}) / 2
 \end{aligned}$$

As demais proporções foram interpoladas ou extrapoladas segundo lógica similar, procedimento no qual foram criadas muitas variáveis auxiliares para permitir a construção gráfica do modelo, tais como:

Para $209.56 < n_s \leq 441.18$:

$$Re = (0.69392 + 0.00239 * x - 1.6238 * \text{math.pow}(10, -6) * x^{**2}) / 2$$

Para $83.28 < n_s \leq 209.56$:

$$Re = (1.50243 - 0.00251 * x + 1.63718 * \text{math.pow}(10, -6) * x^{**2} + 8.3541 * \text{math.pow}(10, -9) * x^{**3}) / 2$$

Para $83.28 < n_s \leq 441.18$:

$$\begin{aligned}
 C &= 1.51 \\
 E5 &= (0.75 * J) \\
 R5 &= 0.647058824 * R4
 \end{aligned}$$

Onde:

R_e é o raio do círculo inicial da tomada d'água na caixa espiral;

E_5 e R_5 são, respectivamente, a posição em y e o raio do círculo final da caixa espiral

Quando a variável n_s situar-se fora do intervalo acima, isto é, abaixo de 83,28 rpm¹¹ ou acima de 441,18 rpm, a formulação não é válida para turbinas tipo Francis e o algoritmo criado irá distorcer a geometria. O mesmo se dará quando a variável D_s resultar abaixo de 1,22m. Neste caso, a geometria do tubo de sucção seria cônica e esta hipótese não foi coberta pelo algoritmo desenvolvido neste trabalho.

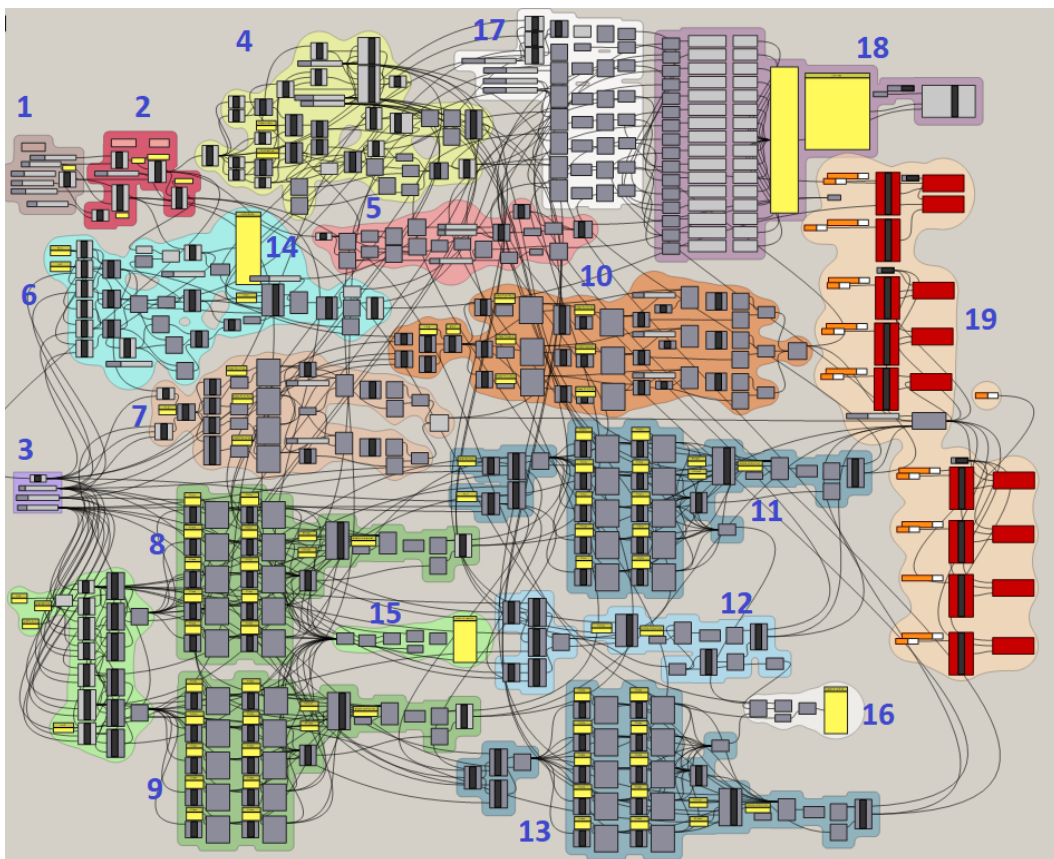
¹¹ rpm: rotações por minuto.

c. Desenvolvimento da modelagem com algoritmos generativos

Os parâmetros e equações mencionados possibilitam então sequenciar a determinação dos elementos gráficos que definem a geometria de cada parte da caixa espiral e do tubo de sucção. Os algoritmos criados mesclam a utilização de componentes do GH com programação Python e algumas poucas ferramentas desenvolvidas para funções específicas, como é o caso dos *fillets* diferenciados. O GH não dispõe de componentes prontos para algumas operações, tais como gerar *fillets* diferentes nos cantos de um retângulo.

Os principais conjuntos de componentes foram agrupados, conforme partes das estruturas a modelar, pois a multiplicidade de conexões entre as operações, representadas por linhas interligando os operadores, tende a tornar o aspecto visual mais emaranhado à medida em que o algoritmo vai sendo incrementado. A esses grupos foram atribuídas cores que facilitam sua rápida identificação (fig. 15).

FIGURA 15 – ASPECTO VISUAL GERAL DO ALGORITMO DESENVOLVIDO



Fonte: Algoritmo desenvolvido pelo autor deste trabalho utilizando o plug-in Grasshopper

Os grupos representam:

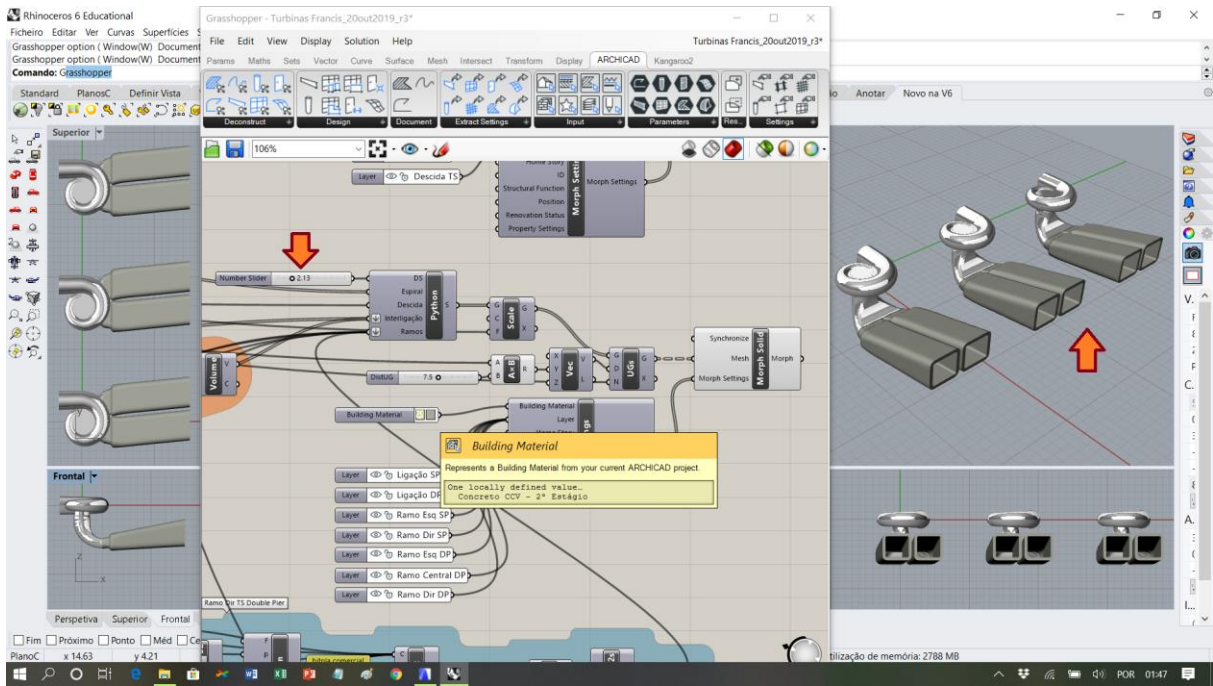
1. Parâmetros gerais da usina
2. Parâmetros gerais das turbinas
3. Parâmetros gerais de controle da geometria
4. Caixa espiral
5. Representação simplificada do rotor
6. Descida do tubo de sucção
7. Transição entre a descida e os dois ramos do tubo de sucção, na hipótese de um pilar-septo (*Single Pier*)
8. Ramo esquerdo do tubo de sucção (*Single Pier*)
9. Ramo direito do tubo de sucção (*Single Pier*)
10. Transição entre a descida e os três ramos do tubo de sucção, na hipótese de dois pilares-septo (*Double Pier*)
11. Ramo esquerdo do tubo de sucção (*Double Pier*)
12. Ramo central do tubo de sucção (*Double Pier*)
13. Ramo direito do tubo de sucção (*Double Pier*)
14. Cálculo das velocidades na descida do tubo de sucção
15. Cálculo das velocidades nos ramos do tubo de sucção (*Single Pier*)
16. Cálculo das velocidades nos ramos do tubo de sucção (*Double Pier*)
17. Estruturas de concreto (para caixa espiral e tubo de sucção)
18. Cômputo dos volumes de aço e concreto (possibilita exportação para excel e softwares BIM¹²)
19. Geração de *morphs* na escala do D_s calculado, replicação e posicionamento das unidades de geração (conjunto de operações que possibilita a definição do tamanho da casa de força e a integração com BIM)

O algoritmo foi desenvolvido para selecionar e mostrar automaticamente os ramos do tubo de sucção gerados. A condição é limitada por $[D_s]$, conforme

¹² Conexão grasshopper-rhinoceros-archicad e plug-in lunchbox

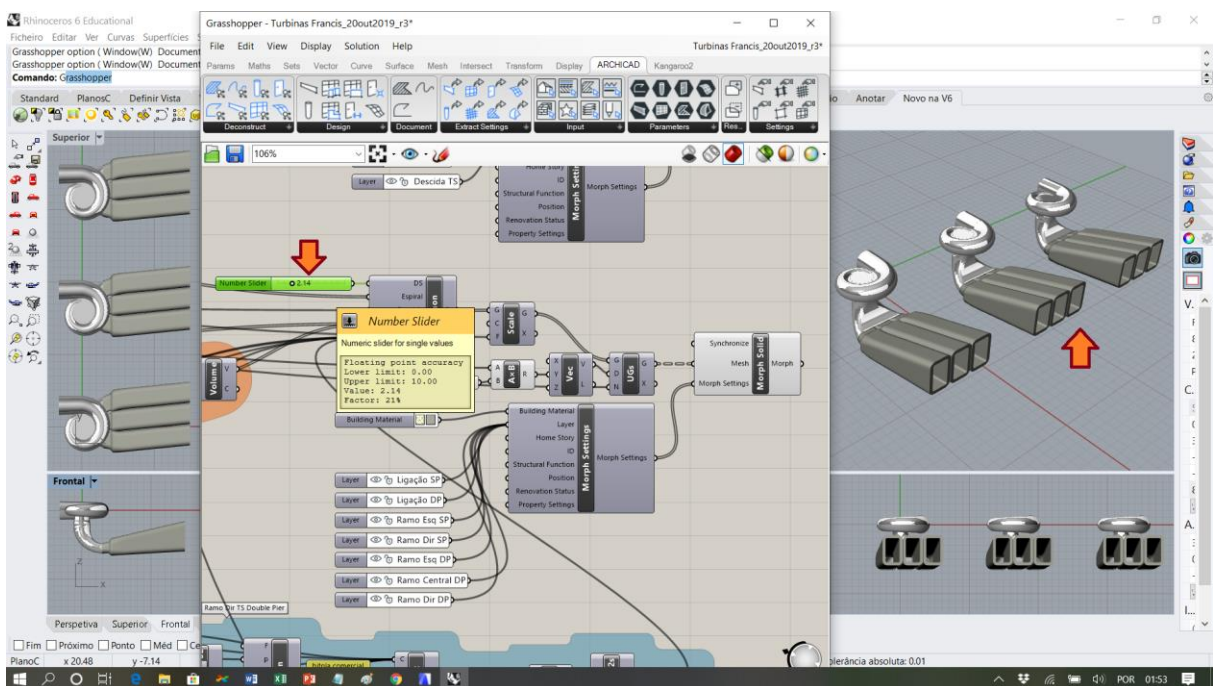
preconizado na publicação americana de seleção de turbinas já referenciada. Quando D_s resultar menor ou igual a 2,13m a solução apresenta dois ramos. Se $D_s > 2,13m$ o algoritmo gera três ramos (fig. 16 e 17).

FIGURA 16 – Tubo de sucção com dois ramos [$D_s \leq 2,13m$]



Fonte: Algoritmo desenvolvido pelo autor deste trabalho utilizando o plug-in Grasshopper

FIGURA 17 – Tubo de sucção com três ramos [$D_s > 2,13m$]



Fonte: Algoritmo desenvolvido pelo autor deste trabalho utilizando o plug-in Grasshopper

d. Conexão com o software BIM

As formas correspondentes aos algoritmos desenvolvidos no GH podem ser visualizadas imediatamente no ambiente Rhinoceros, à medida em que os *scripts* vão sendo escritos. O modelo gerado pelo Grasshopper foi integrado ao software BIM ARCHICAD através de uma conexão desenvolvida pela Graphisoft, uma empresa do Grupo Nemetschek, desenvolvedora do programa ARCHICAD. No ambiente BIM, mais informações não gráficas podem ser acrescentadas ao modelo e as informações geradas pelo algoritmo podem ser melhor exploradas para fins de planejamento, projeto e orçamento.

A conexão Grasshopper-Rhinoceros-ARCHICAD é constituída por dois *add-ons* que trabalham juntos, ligando os softwares entre si de forma dinâmica, bilateral e em tempo real. As funcionalidades de cada programa são complementadas pelos outros, em qualquer fase do projeto. A capacidade de edição paramétrica do Grasshopper é aplicada diretamente a elementos construtivos predefinidos do ARCHICAD com seus elementos geométricos 2D e 3D e seus parâmetros. A ferramenta converte diretamente qualquer geometria do Rhinoceros em elementos construtivos BIM ao se usar a interface Grasshopper, enquanto mantém o controle algorítmico do modelo. Devido a esse *link* dinâmico, qualquer elemento (geometrias básicas ou componentes BIM completos) originado em qualquer um dos três ambientes - Rhinoceros, Grasshopper ou ARCHICAD - pode ser armazenado ou referenciado no *script* do algoritmo. A troca de dados apresenta alta qualidade graças também à certificação IFC4 do ARCHICAD.

A conexão é mantida ativa ou não conforme a necessidade do usuário. Cada vez que os arquivos são fechados, sempre que se desejar que os elementos se mantenham atualizados de forma bilateral, ao reabri-los será necessário restabelecer a conexão.

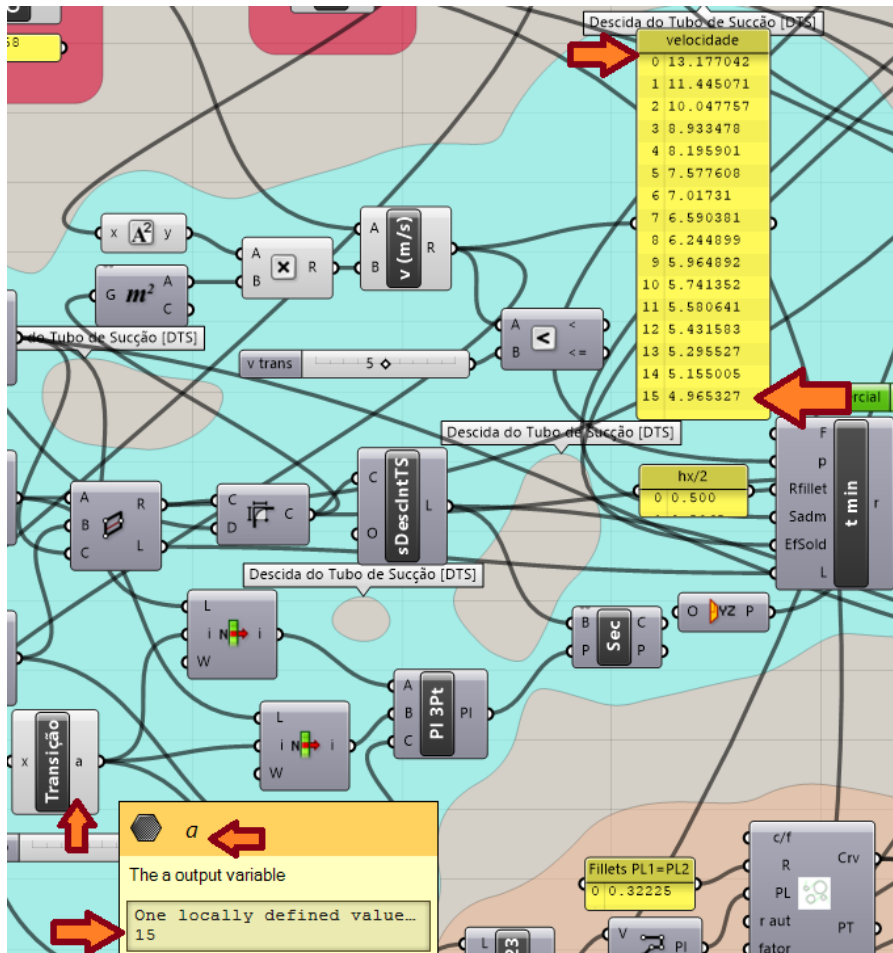
Quando o arquivo gerado pelo algoritmo foi conectado, imediatamente foram geradas as tabelas de quantidades conforme *templates* do ARCHICAD. Assim, os principais materiais, cujas informações foram criadas no modelo GH,

puderam ser lidas. Esta funcionalidade permite basear estimativas do custo geral das estruturas da casa de força, como subsídio a decisões de projeto que escolherão a melhor alternativa técnica para o aproveitamento de geração em estudo.

A conexão entre o Grasshopper e o ARCHICAD permite a conversão da geometria modelada no Rhinoceros-Grasshopper em elementos ARCHICAD BIM como se fossem nativos. O resultado é um modelo BIM como se fosse criado em ARCHICAD e que pode ser editado em ARCHICAD depois. Destaca-se que é possível inserir em todos os elementos do modelo informações, propriedades, classificações e regras IFC. Uma vez que o modelo tenha sido importado no ARCHICAD, pode-se exportar arquivos IFC para projetos colaborativos na plataforma OpenBIM ou para qualquer outro software BIM, tais como, além dos já citados: Tekla, All Plan, Solibri, Revit, etc.

No algoritmo previu-se a geração do modelo em escala, ou seja, a geometria gerada com $D_s = 1\text{m}$ é escalada para o diâmetro calculado ao final do processo. O módulo resultante foi replicado pelo número de unidades geradoras da usina, de modo a facilitar o dimensionamento do espaço interno necessário à Casa de Força e permitir a quantificação de materiais dessa estrutura. Nas figuras 16 e 17 o modelo já aparece escalado e replicado. Além disso, os ramos já aparecem também com a estrutura de concreto modelada, envolvendo o aço. Os componentes gerados são *morphs*, a partir da conexão com o ARCHICAD. Eles levam informações sobre os materiais (parâmetro *building material*) e a informação do volume. A secção que define a transição entre os materiais (aço ASTM A516 e ASTM A36 + concreto), calculada em razão da velocidade quando passa a ser menor que 5m/s, recaiu sobre a secção de nº 15, que é a última secção da Descida do Tubo de Sucção. A partir desse ponto, então, o tubo de sucção pode ser revestido com aço A36 e concreto em função da velocidade da água e pressão sobre o duto (fig. 18).

FIGURA 18 – Transição entre aço A516 e concreto [$v < 5\text{m/s}$]



Fonte: Algoritmo desenvolvido pelo autor deste trabalho utilizando o plug-in Grasshopper

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O algoritmo em desenvolvimento foi apresentado à concessionária de energia do Paraná, a COPEL Geração e Transmissão S.A., representada pelo Departamento de Engenharia Civil e pelo Departamento de Engenharia Eletromecânica. Na ocasião, apenas as superfícies da caixa espiral e do tubo de sucção haviam sido geradas. Apresentou-se também um questionário para aferir as

principais premissas do trabalho, complementar aspectos técnicos e para levantar dados comparativos de estudos realizados sem BIM.

Os desdobramentos dessa reunião são descritos nos subitens seguintes.

4.1 PROCESSO DE GERENCIAMENTO DE PROJETO SEM BIM

O Departamento de Engenharia Civil da COPEL gentilmente levantou dados de planilhas oficiais da Divisão de Estudos de Geração, correspondentes à apropriação de mão de obra de modelagem civil em pequenas centrais hidrelétricas e os enviou (tab. 3).

Na coluna HH estão os totais de mão-de-obra gastos em estudos de sete empreendimentos selecionados por aquele Departamento, considerados mais representativos para a finalidade deste trabalho acadêmico. Esses totais incluem o trabalho de desenhistas e de engenheiros civis, exclusivamente gasto com modelagem de estruturas 3D da Casa de Força. Esta Divisão é a única na Copel Geração que modela em 3D.

TABELA 3 – Apropriação de mão-de-obra na modelagem de estruturas civis 3D

Empreendimento	HH civil Modelagem 3D Estruturas	HH civil (inferida) Modelagem 3D - Caixa Espiral e Tubo de Sucção
A	1.251,34	188
B	1.657,81	249
C	1.022,94	153
D	429,35	64
E	245,40	37
F	740,42	111
G	777,46	117

Fonte: Divisão de Estudos de Geração da COPEL

Não foram obtidos dados semelhantes do Departamento de Engenharia Eletromecânica, portanto a mão-de-obra da área eletromecânica não está

computada na totalização constante da tabela. Note-se que o processo de modelagem naquele departamento não inclui 3D, donde pode-se afirmar que o número de horas de trabalho tende a ser maior que o do departamento civil. Também não está computada a mão-de-obra necessária ao orçamento, elaborado por um terceiro departamento, que envolve quantificação não integrada à modelagem pelo processo convencional que se realiza atualmente.

4.2 PROCESSO DE GERENCIAMENTO DE PROJETO COM BIM

A modelagem da caixa espiral e do tubo de sucção de uma turbina com uso de algoritmos generativos e integração com um software BIM requer cerca de 40 minutos¹³, já computados:

- Inicialização do programa de algoritmos e abertura do arquivo
- Carga dos parâmetros de entrada
- Processamento dos cálculos e geração do modelo no GH
- Conexão com o ARCHICAD e geração do modelo no ARCHICAD

A modelagem apresenta recursos interativos de manipulação das variáveis, de modo que o estudo de modificações é ainda mais rápido: cerca de 25 minutos.

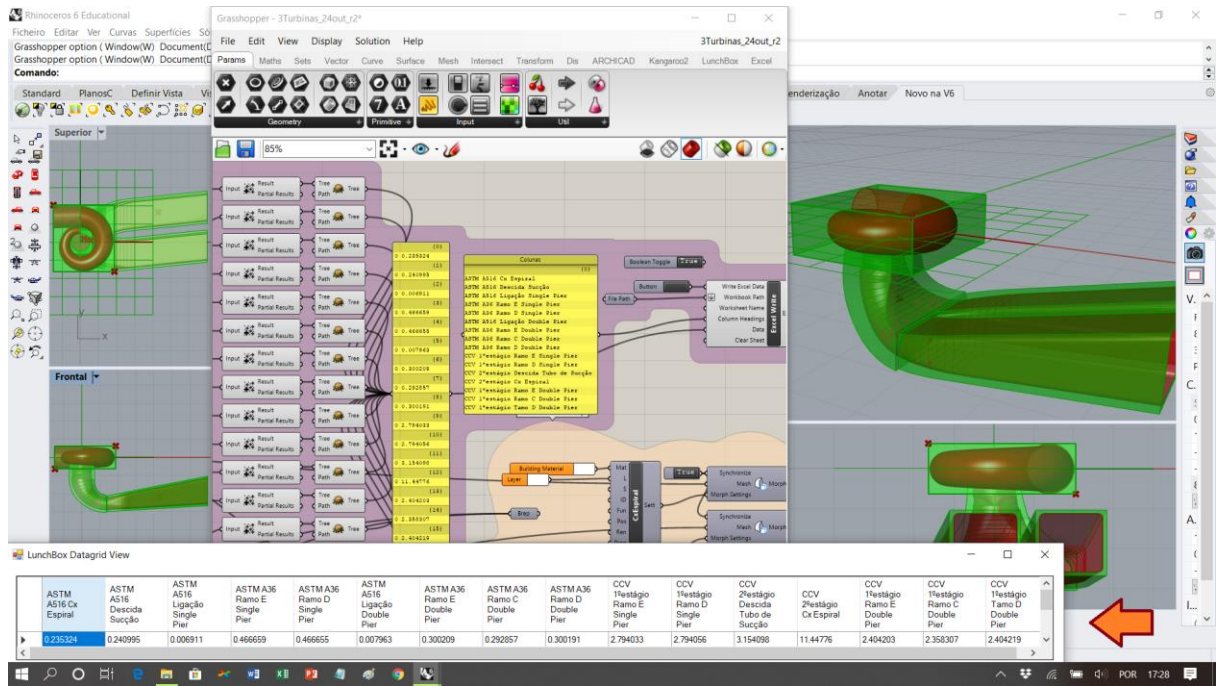
As características dos materiais e suas quantidades, além de outras propriedades que se deseje incluir, são apresentadas juntamente com os modelos, de forma interativa, isto é, ao se mudar os parâmetros, o modelo é atualizado automaticamente. Esta funcionalidade é um ganho qualitativo importante gerado no processo proposto.

A figura 19 demonstra a quantificação dos materiais em determinado momento da modelagem, tanto no *panel* amarelo de *output* do Grasshopper, que permite a integração com o ARCHICAD, quanto na correspondente planilha do *plugin Lunchbox*, que permite exportação para o MS Excel. Repara-se que nesse

¹³ Tempo aferido em um notebook com processador Intel core i7-4510U, RAM 16GB, CPU 2.00 GHz

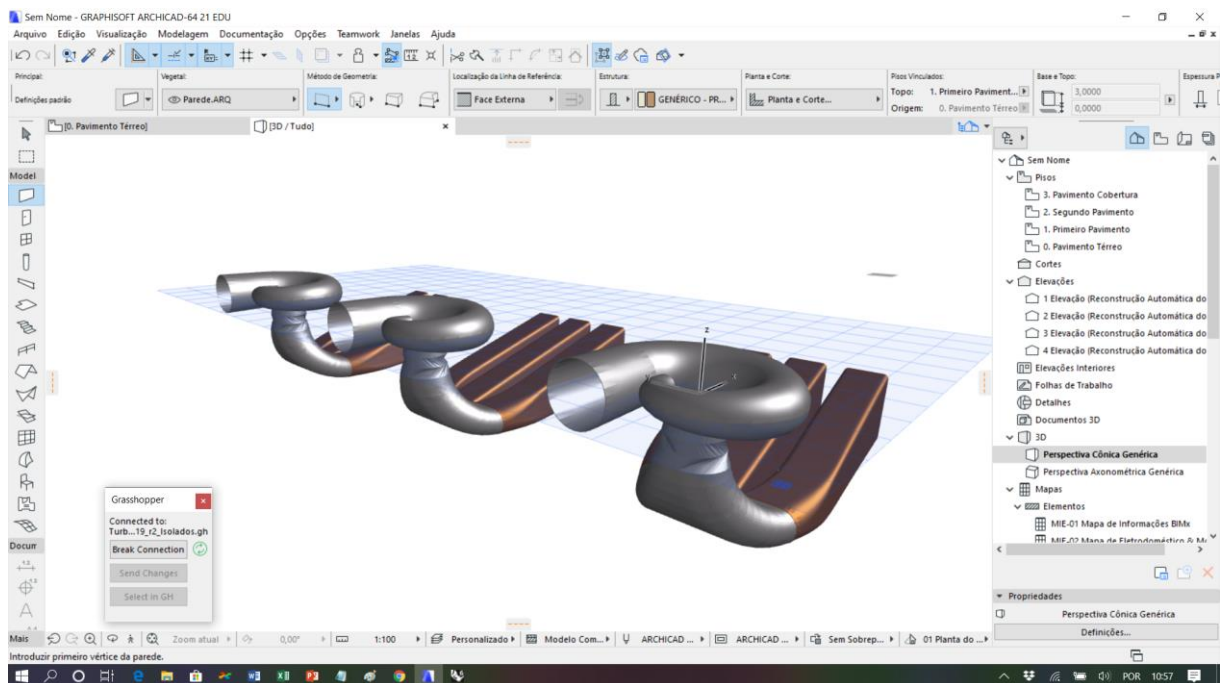
instante, as envoltórias de concreto já estavam configuradas pelo algoritmo. As quantidades apresentadas dizem respeito a apenas uma turbina, pois o comando *array* de replicação não havia sido dado ainda.

FIGURA 19 – Quantidades dos materiais integradas ao modelo



Fonte: Algoritmo desenvolvido pelo autor deste trabalho utilizando o plug-in Grasshopper

FIGURA 20 – Modelo integrado no ARCHICAD

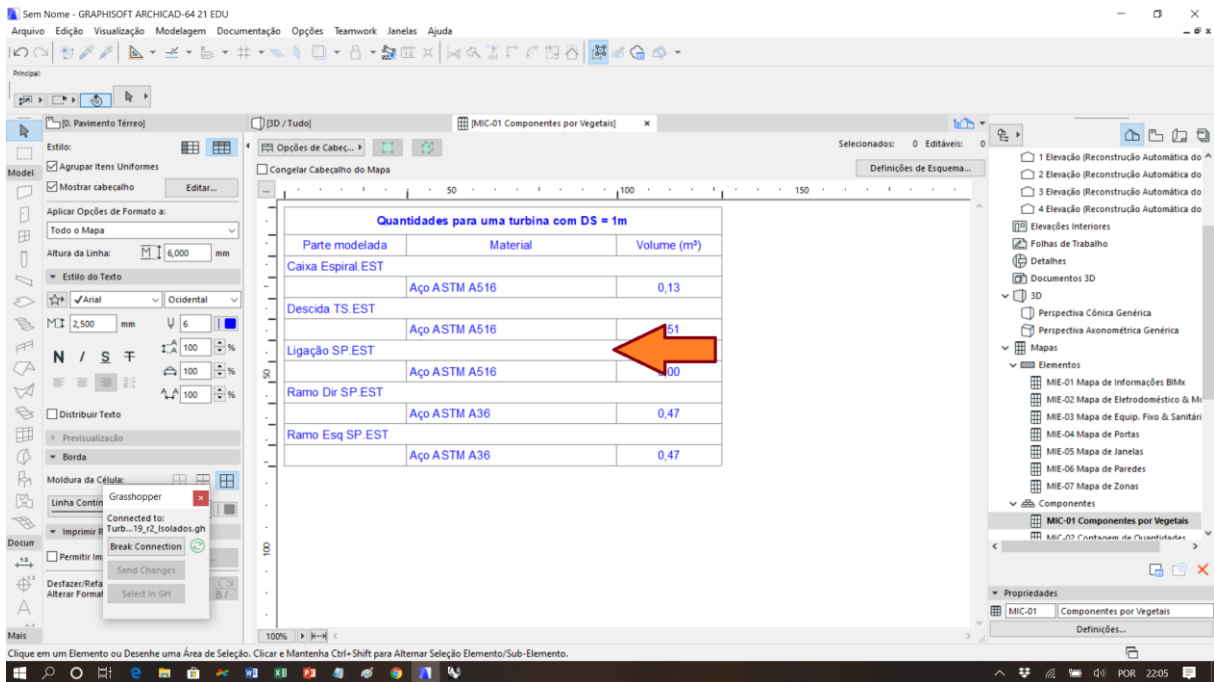


Fonte: Algoritmo desenvolvido pelo autor deste trabalho utilizando o plug-in Grasshopper

A figura 20 mostra o modelo visualizado e operável no ARCHICAD, a integração com o software BIM, através da conexão Grasshopper, ativa.

Em momento anterior da modelagem, um exemplo de como as quantidades são automaticamente vinculadas ao modelo e, portanto, aparecem nos templates do ARCHICAD (fig. 21).

FIGURA 21 – Exemplo de relatório de quantidades no ARCHICAD



Quantidades para uma turbina com DS = 1m		
Parte modelada	Material	Volume (m³)
Caixa Espiral EST		
	Aço ASTM A516	0,13
Descida TS EST		
	Aço ASTM A516	0,51
Ligação SP EST		0,00
	Aço ASTM A516	
Ramo Dir SP EST		
	Aço ASTM A36	0,47
Ramo Esq SP EST		
	Aço ASTM A36	0,47

Fonte: Algoritmo desenvolvido pelo autor deste trabalho utilizando o plug-in Grasshopper

4.3 COMPARAÇÃO DOS PROCESSOS

O processo de gerenciamento de projeto sem BIM é, maciçamente, predominante em obras de infraestrutura. Caracteriza-se, em sua maioria, pelo desenvolvimento separado das disciplinas, com reuniões de coordenação onde se procura envolver todos os agentes pertinentes. Por conta desse desenvolvimento em separado, há defasagens no desenvolvimento de cada disciplina, de modo que uma avança mais que outra no mesmo período de tempo. As implicações das mudanças de projeto e os avanços defasados geram retrabalhos. Também, o desenvolvimento em 2D frequentemente acarreta interferências entre as disciplinas, muitas das quais somente são percebidas na fase de construção.

Já o processo com BIM tira partido das inovações tecnológicas contemporâneas, incorporando parte delas ao gerenciamento do projeto. O avanço tecnológico promove novas maneiras de criar, de projetar e de produzir objetos, equipamentos, edifícios e infraestrutura. Haja vista a evolução das telecomunicações, dispositivos móveis, aplicativos ultrarrápidos, acesso a quase todo tipo de informação em tempo real, reuniões por teleconferência, equipes constituídas por pessoas de cidades e até países diferentes, formas de trabalho mais colaborativas, processadores e programas de alta performance, cada vez mais visuais, além da possibilidade de modelagem de formas complexas e da impressão 3D. O BIM é uma tecnologia baseada em objetos virtuais, paramétricos e que portanto, reagem a determinadas condições como se fossem inteligentes. Além de conterem as informações sobre si mesmos, podem ter informações sobre a relação com outros objetos e componentes do modelo.

A visualização dos elementos projetados, no processo com BIM, é muito melhor. A modelagem permite perceber detalhes com exatidão, por mais complexa que seja a obra. E oferece funcionalidades para detecção automática de interferências geoespaciais entre componentes. Permite simulações virtuais da construção, o que proporciona condições muito melhores de antecipar e corrigir conflitos entre as disciplinas. Há maior integração com softwares de planejamento e controle. A extração automática de quantidades é outro aspecto relevante, aliada à maior precisão e consistência. As simulações de desempenho das edificações ou de suas partes são funcionalidades que não existem no processo convencional.

Todo esse amplo cenário é relevante, e não deve ficar perdido do contexto, mesmo que a delimitação do tema escolhido não propicie incursões mais profundas no aspecto gerencial, porque as diferenças são significativas e as possibilidades ainda inexploradas são enormes. Para melhor compreensão destas afirmações sugere-se consulta às publicações de instituições que se dedicam ao assunto, tais como o informativo intitulado “10 motivos para evoluir com o BIM”, da Câmara Brasileira da Construção – CBIC e o site da BuildingSmart. O presente trabalho

acabou se concentrando mais no aspecto da modelagem de formas complexas com algoritmos generativos e da quantificação de alguns materiais para ilustrar o potencial da metodologia.

No que diz respeito ao foco desta abordagem, por ser um processo bem maturado, a apropriação de mão-de-obra da COPEL revela que os estudos são feitos de modo bastante ágil, considerando o contexto e a limitação da tecnologia sem BIM. Mesmo assim, considerando que a área eletromecânica gaste apenas 70% do esforço de trabalho que a área civil, apesar do processo ser em 2D, e que o esforço de quantificação dos materiais represente só 10% do tempo apropriado nas atividades de modelagem civil, tem-se uma economia média de 235 homens-hora por empreendimento – tão somente no processo de modelagem da caixa espiral e tubo de sucção. Considere-se adicionalmente que esses números representam uma estimativa para baixo, pela ausência de dados mais específicos, além de não se levar em conta ganhos secundários referentes à concepção da envoltória da Casa de Força, planejamento, gerenciamento e estudos de modificações.

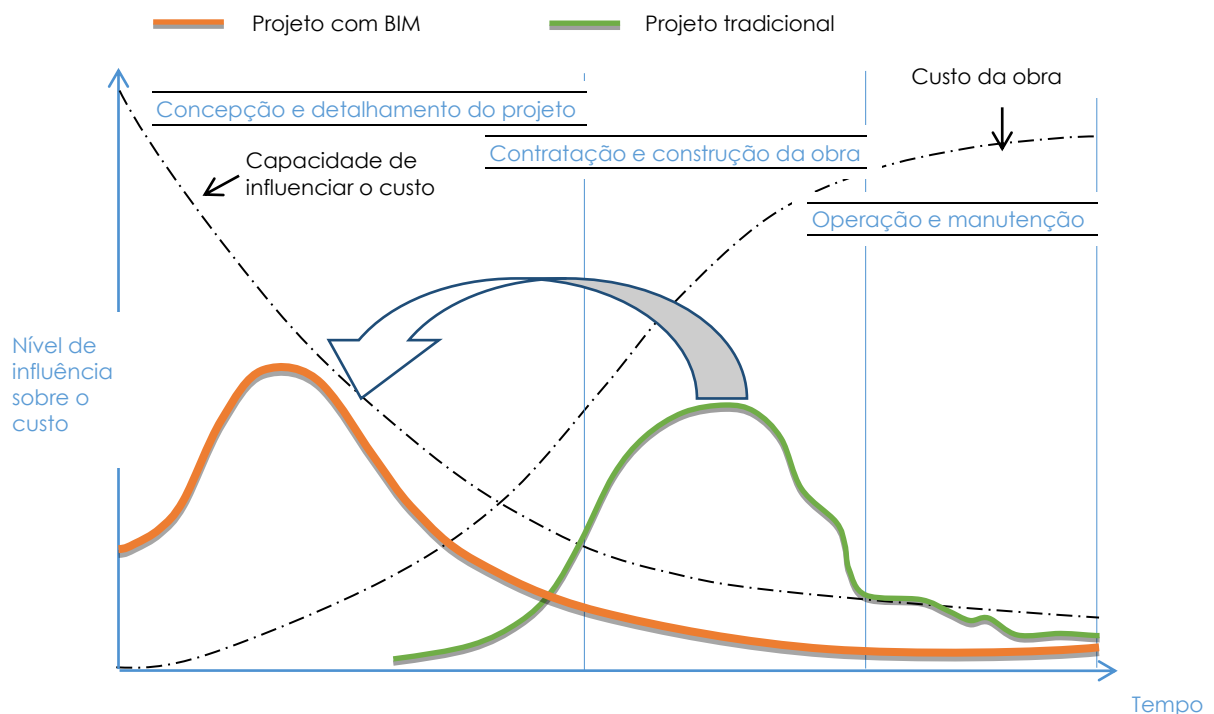
Possivelmente por essas razões, questionados a respeito da utilidade e aplicação de algoritmos generativos com BIM, os departamentos presentes na reunião com a Concessionária de energia retornaram as seguintes respostas:

1. “O trabalho com algoritmos pode ser útil para várias atividades de modelagem de estruturas que realizamos. ”
2. “Quase todas as estruturas podem ser modeladas com algoritmos, pois sua geometria e dimensões vêm de dimensionamento hidráulico e estrutural (vertedouro, desvio, circuito de geração e barragem). ”
3. “A dificuldade é que esses algoritmos devem criar volumes que sejam limitados pela fundação escavada. ”
4. “Acredito que será de grande utilidade na elaboração de estudos de casa de força na área eletromecânica. ”
5. “Outra utilização interessante seria na distribuição de aerogeradores

em parques eólicos, mas ainda não temos conhecimento sobre esse assunto.”

A respeito do gerenciamento propriamente dito do processo de projeto, a realização de forma conjunta, simultânea e integrada entre as diversas disciplinas, favorece a consistência, a compatibilização entre os elementos e a antecipação de decisões, reduzindo o impacto das alterações sobre os custos. Neste enfoque, cabe salientiar, mesmo que rapidamente, a curva “Projeto com BIM” (Figura 22), que representa o resultado da metodologia BIM. Esta, mais especialmente, oferece maior controle sobre o esforço gerado e sobre o incremento de custo resultantes das mudanças, quando comparado aos das curvas que caracterizam processos tradicionais de projeto, sem BIM.

FIGURA 22 – Impacto das mudanças conforme a evolução do projeto



Fonte: Adaptado de AIA – *Integrated Practice Website*, <http://aia.org/ip.default>, e de EASTMAN, Manual de BIM. O uso do BIM no processo de projeto terá maior influência sobre a redução dos custos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na comparação com o processo convencional de projetos de usinas, resta constatada, pela apropriação de mão-de-obra aferida em ambos os processos – que o processo com BIM gera significativa economia de mão-de-obra de modelagem, maior rapidez na obtenção das quantidades dos materiais e, por consequência, dos custos resultantes de cada alternativa técnica, com maior consistência e qualidade de informações.

Acabaram não sendo quantificados fatores pertinentes ao processo de gerenciamento, mais especificamente. O esforço de normatização, padronização, classificação e disponibilização de bibliotecas de componentes BIM ainda não alcançou efetividade no Brasil em obras de infraestrutura. Não há, na maioria das empresas que atuam neste segmento, histórico organizado de apropriação de custos de projeto de obras de infraestrutura que permita uma análise quantitativa mais apurada, de modo a comparar custos de processos com e sem BIM neste setor, também porque poucas empresas empregam tal tecnologia. A análise possível no momento, portanto, é qualitativa, mas com indícios robustos de ganhos significativos decorrentes do processo.

A discussão com profissionais que exercem ou exerceram funções de projeto e gerenciamento de projeto, obras e contratos de usinas hidrelétricas sem uso de BIM, pelas respostas aos questionamentos elaborados, revelou que há uma clara percepção de benefícios resultantes do uso de algoritmos associados ao BIM. Pode-se afirmar, assim, do ponto de vista qualitativo, que há valor agregado ao processo de projeto de usinas hidrelétricas devido ao uso do BIM, com base no desenvolvimento deste algoritmo e nas comparações e depoimentos dos profissionais da empresa pesquisada.

Com base no estudo realizado na modelagem da caixa espiral e do tubo de sucção da turbina tipo Francis de eixo vertical escolhida, assim como pela evolução

das exigências governamentais no fomento à utilização do BIM¹⁴, pela tendência da indústria e pelo exemplo de práticas em outros países mais desenvolvidos economicamente, é possível afirmar que, a médio prazo, há espaço para a migração do processo convencional de projeto de usinas hidrelétricas para o processo de projeto com modelagem da informação da construção. O processo deve proporcionar melhoria da base de tomada de decisões de projeto, possibilidade de interferir na redução dos custos do empreendimento mais cedo que no processo sem BIM, maior integração e consistência das informações, redução de conflitos entre as disciplinas de projeto e maior agilidade na análise de alternativas.

O estudo realizado abre possibilidade de estender sua aplicação a outros tipos de turbinas (Pelton, Kaplan e Bulbo, por exemplo), assim como turbinas que utilizem outras fontes de energia (gás, vapor, ciclos combinados), outros ângulos de eixo, além da possibilidade de utilização de algoritmos generativos na análise de outros tipos de estruturas (vertedouros, barragens, túneis, tomadas d'água, condutos forçados, parques eólicos).

O algoritmo pode ser modificado para contemplar o seccionamento parametrizado das virolas da caixa espiral em peças otimizadas, em função de seu tamanho e peso, por exemplo. Além disso, a modelagem pode ser aprofundada e complementada com a parametrização da envoltória estrutural da turbina e outros ambientes da casa de força. A representação deste algoritmo poderá ser bastante simplificada mediante reunião de várias operações dos componentes e sua substituição por *scripts* em linguagem de programação nativas do GH, tais como Python, C# e Visual Basic.

No que diz respeito a softwares BIM de arquitetura e outras disciplinas, as superfícies de escavação podem ser integradas ao modelo, proporcionando novos benefícios ao processo de projeto.

¹⁴ O Decreto Federal nº 9.377, de 17 de maio de 2018, oficializou a Estratégia BIM BR e instituiu metas para implementação da metodologia até 2028. Entre elas, está a de aumentar a implantação do BIM de forma que até 2024 50% do PIB da construção civil a tenha adotado. Em 2018 9,2% das empresas de construção utilizavam BIM, o que corresponde a 5% do PIB do setor.

Por fim, cabe mencionar o campo de possibilidades aberto pela impressão 3D na prototipagem em escala menor e uso de CNC para fabricação das peças da caixa espiral e do tubo de sucção.

REFERÊNCIAS

ASME-THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Boiler and Pressure Vessel Code**. Section II – Materials. Part D – Properties. Section VIII – Division 1. Part UG-27 – Rules for Construction. New York: NY, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESCRITÓRIOS DE ARQUITETURA-RS. **Caderno técnico AsBEA-RS: migração BIM**. Porto Alegre: AsBEA-RS, 2015.

LEE, Ghang; SACKS, Rafael; EASTMAN, Charles M. **Automation in Construction: Specifying parametric building object behavior for a building information modeling system**. Oxford, 2006.

EASTMAN, Charles M. [et al]. **Manual de BIM: um guia de modelagem da informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores**. Porto Alegre: Bookman, 2014. 483 p.

ELETROBRAS. **Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Arquivo eletrônico: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Manuais-e-Diretrizes-para-Estudos-e-Projetos.aspx>.

POLONINI, Flávia Biccias da Silva. **A modelagem paramétrica na concepção de formas curvilíneas da arquitetura contemporânea**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal da Bahia. Faculdade de Arquitetura. Salvador, 2014.

SENA, Anderson José Costa. **Desenvolvimento e implantação de um sistema de monitoração on-line de hidrogeradores**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Pará. Belém, 2008.

TEDESCHI, Arturo. **Parametric Architecture: with grasshopper**. Brienza: Le Penseur, 2011. 206 p.

UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR. Bureau of Reclamation. **Selecting Hydraulic Reaction Turbines**. Engineering Monograph nº 20, p.19 a 28. A water resources technical publication. Washington: U.S. Government Printing Office, 1976.