

INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO

FÁBIO YUKIO NARA

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
ENSAIOS DE RENDIMENTO DE TURBINAS KAPLAN**

Curitiba

2020

FÁBIO YUKIO NARA

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
ENSAIOS DE RENDIMENTO DE TURBINAS KAPLAN**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Área de Concentração Sistemas Energéticos Convencionais e Alternativos, do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento de Tecnologia.

Orientador: Prof. Renato de Arruda Penteado Neto

Curitiba

2020

CATALOGAÇÃO NA FONTE – SIBI/UFPR

N218d

Nara, Fábio Yukio

Desenvolvimento de ferramenta computacional para ensaios de rendimento de turbinas kaplan [recurso eletrônico]/ Fábio Yukio Nara, 2020.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Área de Concentração Sistemas Energéticos Convencionais e Alternativos, do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná.

Orientador: Prof. Renato de Arruda Penteado Neto

1. Turbinas hidráulicas. 2. Usinas hidrelétricas. I. Penteado Neto, Renato de Arruda. II. Título.

CDD 621.312134

Bibliotecária: Vilma Machado CRB9/1563

TERMO DE APROVAÇÃO

FÁBIO YUKIO NARA

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ENSAIOS DE RENDIMENTO DE TURBINAS KAPLAN

Trabalho de conclusão de curso aprovado como requisito para obtenção do grau de Mestre, no Mestrado Profissional do Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, realização do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná (IEP), pela seguinte banca examinadora:



ORIENTADOR(A): Prof.^(a) Dr.^(a) Renato de Arruda Penteadinho Neto
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)



Prof.^(a) Dr.^(a) Lúcio de Medeiros
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)



Prof.^(a) Dr.^(a) Marcelo Rizzo Errera
Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Curitiba, 17 de fevereiro de 2020.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família que esteve sempre ao meu lado, me apoiando e incentivando em todos os momentos.

Ao meu orientador Renato de Arruda Penteado Neto por seu incentivo, apoio, conselhos e disponibilidade para orientação.

Aos meus amigos Adilson Leskowicz, Eduardo Massashi Yamao, Felipe Tabora Ribas Tovar e Gabriel Maidl, que ao longo desta etapa me apoiaram e me encorajaram.

Aos meus colegas e professores do programa de mestrado.

Ao Programa Aneel pelo projeto PD-6683-0118/2018, “Desenvolvimento de Técnicas de Deposição de Revestimentos por Aspersão Térmica Robotizada para Redução de Desgaste por Erosão e Cavitação em Turbinas Hidráulicas”,

A Santo Antônio Energia e equipe do projeto P&D pela permissão do uso de informações e suporte nos ensaios rendimento.

Ao Lactec e colegas do trabalho por ter proporcionado esta oportunidade.

RESUMO

O Ensaio de Rendimento Relativo, ou *Index Test*, possui grande importância para uma hidrelétrica porque, através dos resultados deste ensaio, é possível avaliar o comportamento de uma turbina hidráulica e permitir tomadas de decisão, como, por exemplo, definir a necessidade de realização de ajustes em seu sistema de controle para obter um melhor desempenho do equipamento, ou a necessidade de manutenção corretiva na turbina. Atualmente, utilizam-se planilhas para processar os dados coletados do ensaio e obter o rendimento da turbina, porém uma das limitações da utilização dessas planilhas, é o fato de não identificar o ponto de máximo rendimento durante o ensaio, sendo necessário coletar vários pontos da combinação entre abertura do distribuidor e das pás do rotor para se obter um melhor resultado, aumentando o tempo para do ensaio e, conseqüentemente, a indisponibilidade da unidade geradora para a produção de energia elétrica. Outro aspecto é que durante a operação das planilhas pode ocorrer erro humano, fazendo com que se despenda um tempo excessivo para obter os valores corretos, resultando em um aumento no custo do serviço executado. Neste contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para ensaios de rendimento relativo, utilizando a linguagem LabVIEW para a sua implementação. Além de obter os mesmos resultados das planilhas, através de método de regressão polinomial de terceira ordem, esta ferramenta obtém o melhor ponto de rendimento da turbina durante os ensaios. A validação da ferramenta computacional foi efetivada em ensaios de rendimento realizados na usina hidrelétrica de Santo Antônio e os resultados obtidos foram comparados com o método atualmente utilizado. A conclusão foi que, para a potência de 53 MW, o rendimento é aproximadamente 0,56% superior, caso o regulador de velocidade seja ajustado para operar conforme a curva de conjugação obtida pela ferramenta computacional. Adicionalmente à determinação do ponto de maior rendimento, a utilização da ferramenta permitiu a redução na quantidade de horas utilizadas para obter os resultados. Com as planilhas são necessárias em média 10 horas para parametrizar e processar os dados antes e após o ensaio, e assim gerar os resultados para relatório, e com a ferramenta computacional, em média 3 horas.

Palavras-chave: Ensaio de rendimento; Turbinas Kaplan; Turbinas Bulbo; *Index Test*; Winter-Kennedy.

ABSTRACT

The Relative Performance Test, or Index Test, is of great importance for a hydroelectric plant. Index Tests are used to evaluate the behavior of a hydraulic turbine and allow decision-making process such as defining adjustments to achieve a better equipment performance, or supporting maintenance services. Currently, spreadsheets are used to process the data collected from the test and calculate the turbine performance. However, one of the restrictions of using a spreadsheet is the fact that it does not identify the maximum point of turbine efficiency during the test. Additionally, a number of data combining the opening of the wicket gate and the propeller blades are needed to obtain a reliable performance result. The use of spreadsheets may lead to human mistakes resulting in an increase in the test cost. In this context, this work presents the development of a computational tool regarding Relative Performance Tests, based on the LabVIEW language for its implementation. Compared to the conventional technique based on spreadsheets, our tool determines instantaneously the best performance point of the turbine during the test. The validation of the computational tool was carried out in performance tests at the Santo Antônio hydroelectric plant and the results were compared with the spreadsheets method. The conclusion was that, for a power of 53 MW, the yield is approximately 0,56% higher, if the speed regulator is adjusted to operate according to a conjugation curve applied by the computational tool. In addition to determine the highest yield point, the use of the tool reduces the number of hours needed to obtain the performance results. By using the spreadsheets, it takes an average 10 hours to parameterize and process the data before and after the test. With our computational tool, on average 3 hours are needed to achieve the same result.

Keywords: Performance Test; Kaplan Turbine; Bulb Turbine; Index Test; Winter-Kennedy.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - EXEMPLO DE CURVA DE RENDIMENTO TEÓRICA E OBTIDA PELO ENSAIO.....	14
FIGURA 2 - PLANILHA PRINCIPAL UTILIZADA PARA CÁLCULO DE RENDIMENTO	16
FIGURA 3 - DADOS DE ENSAIO DA UNIDADE GERADORA 30 DA HIDRELÉTRICA SANTO ANTÔNIO.....	17
FIGURA 4 - CURVA DE CONJUGAÇÃO DA UNIDADE GERADORA 30 PARA QUEDA LÍQUIDA DE 11,3 METROS	18
FIGURA 5 - CURVAS DE RENDIMENTO EM FUNÇÃO DA ABERTURA DO DISTRIBUIDOR PARA DIFERENTES ABERTURAS DAS PÁS DO ROTOR.....	20
FIGURA 6 - REGIÃO COM RENDIMENTO MAIOR QUE O PONTO DETERMINADO PELO ENSAIO	21
FIGURA 7 - TURBINA KAPLAN E PRINCIPAIS COMPONENTES	23
FIGURA 8 - TURBINA BULBO	24
FIGURA 9 - DETALHES DO DISTRIBUIDOR.....	24
FIGURA 10 - LOCALIZAÇÃO DOS NÍVEIS DE INSTALAÇÃO DOS SENSORES E PRESSÃO DE ADUÇÃO E SUÇÃO E DOS NÍVEIS MONTANTE E JUSANTE.....	26
FIGURA 11 - LOCALIZAÇÃO DAS TOMADAS DE PRESSÃO PARA WINTER-KENNEDY EM TURBINAS KAPLAN	27
FIGURA 12 - LOCALIZAÇÃO DAS TOMADAS DE PRESSÃO PARA WINTER-KENNEDY EM TURBINAS BULBO	28
FIGURA 13 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	33
FIGURA 14 - PROGRAMA EM LABVIEW UTILIZADO PARA AQUISIÇÃO DOS DADOS	34
FIGURA 15 - SISTEMA DO MEDIDOR DE POTÊNCIA DO GERADOR	35
FIGURA 16 - SISTEMA DO REGULADOR DE VELOCIDADE	35

FIGURA 17 - SISTEMA DOS SERVIÇOS AUXILIARES.....	36
FIGURA 18 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS	37
FIGURA 19 - DIAGRAMA GERAL	39
FIGURA 20 - DIAGRAMA PARAMETRIZAÇÃO DA UNIDADE GERADORA.....	40
FIGURA 21 - DIAGRAMA REALIZAÇÃO DO ENSAIO ONCAM.....	41
FIGURA 22 - DIAGRAMA DA APRESENTAÇÃO DO ENSAIO OFFCAM	43
FIGURA 23 - DIAGRAMA ATIVIDADES ENSAIO OFFCAM.....	43
FIGURA 24 - DIAGRAMA DA APRESENTAÇÃO DO ENSAIO OFFCAM	46
FIGURA 25 - USINA HIDRELÉTRICA SANTO ANTÔNIO	49
FIGURA 26 - DADOS TÉCNICOS DA TURBINA DE 4 PÁS.....	49
FIGURA 27 - DADOS TÉCNICOS DA TURBINA DE 5 PÁS.....	50
FIGURA 28 - DIAGRAMA de COLINA DA TURBINA DE 4 PÁS.....	51
FIGURA 29 - MEDIÇÃO DA PRESSÃO NA ENTRADA DA TURBINA.....	52
FIGURA 30 - MEDIÇÃO DA PRESSÃO NA SAÍDA DA TURBINA	53
FIGURA 31 - MEDIÇÃO DA PRESSÃO DIFERENCIAL NA TURBINA	53
FIGURA 32 - LOCALIZAÇÃO DAS TOMADAS DE PRESSÃO	54
FIGURA 33 - DADOS E RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA DO ENSAIO UTILIZANDO A FERRAMENTA COMPUTACIONAL.....	56
FIGURA 34 - CURVA DE CONJUGAÇÃO UTILIZADA PELO REGULADOR DE VELOCIDADE OBTIDA PELA FERRAMENTA COMPUTACIONAL.....	57
FIGURA 35 - CURVA DE RENDIMENTO OBTIDO PELA FERRAMENTA COMPUTACIONAL.....	57
FIGURA 36 - DADOS E RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA DO ENSAIO UTILIZANDO A FERRAMENTA COMPUTACIONAL.....	58
FIGURA 37 - VALORES DE ABERTURA SUGERIDOS COM MELHOR RENDIMENTO	59

FIGURA 38 - CURVA DE RENDIMENTO EM FUNÇÃO DA ABERTURA DO DISTRIBUIDOR OBTIDA PELA FERRAMENTA COMPUTACIONAL	60
FIGURA 39 - CURVA DE CONJUGAÇÃO PARA OS DADOS OTIMIZADOS	60
FIGURA 40 - PLANILHA PARA VERIFICAR AS ABERTURAS DE MAIORES RENDIMENTOS DA UG13.....	61
FIGURA 41 - CURVA DE CONJUGAÇÃO LEVANTADA COM MAIOR RENDIMENTO	62
FIGURA 42 - RENDIMENTO EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA PARA AS CURVAS DE CONJUGAÇÃO OBTIDAS NOS ENSAIOS.....	62
FIGURA 43 - RESULTADO DO MODELO PARA 15,90%	64
FIGURA 44 - RESULTADO DO MODELO PARA 22,91%	64
FIGURA 45 - RESULTADO DO MODELO PARA 29,93%	64
FIGURA 46 - RESULTADO DO MODELO PARA 37,94%	65

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - RENDIMENTOS CALCULADOS PARA ABERTURAS SUGERIDAS ...59

TABELA 2 - MODELOS OBTIDOS UTILIZANDO REGRESSÃO POLINOMIAL.....63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	CONTEXTO	13
1.2	OBJETIVOS	18
1.3	JUSTIFICATIVA	19
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	TURBINAS KAPLAN	23
2.2	ENSAIO DE RENDIMENTO INDEX TEST.....	25
2.3	REGRESSÃO POLINOMIAL.....	28
3	ESTADO DA ARTE	30
4	MATERIAIS E MÉTODO	32
4.1	MATERIAIS	32
4.1.1	DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL	32
4.1.2	ENSAIOS DE RENDIMENTO.....	32
4.1.2.1	Transdutor de pressão diferencial para Winter-Kennedy	32
4.1.2.2	Transdutor de pressão para tomada da adução.....	32
4.1.2.3	Transdutor de pressão para tomada da sucção	33
4.1.2.4	Equipamento para aquisição de dados	33
4.1.2.5	Dados do sistema da usina	34
4.2	MÉTODO	37
4.2.1	Levantamento de Requisitos	38
4.2.2	Levantamento de Equações	38
4.2.3	Definição da Linguagem de Programação.....	38
4.2.4	Desenvolvimento da Ferramenta Computacional	39
4.2.5	Testes da Ferramenta Computacional.....	47

4.2.6	Alterações na ferramenta computacional	47
4.2.7	Ensaio de Rendimento.....	47
4.2.8	Avaliação dos Resultados	47
5	ESTUDO DE APLICAÇÃO	48
5.1	Usina Hidrelétrica de Santo Antônio	48
5.2	Ensaio de Rendimento	52
6	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	66
	REFERÊNCIAS	68
	APÊNDICE I - ENSAIO DE RENDIMENTO	70
	APÊNDICE II - RESULTADOS OBTIDOS PELA PLANILHA PRINCIPAL NO ENSAIO OFFCAM	72
	APÊNDICE III - INCERTEZA DE MEDIÇÃO	79
	APÊNDICE IV - MODELOS E RESULTADOS OBTIDOS PELA REGRESSÃO POLINOMIAL	81

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

A geração hidrelétrica representa aproximadamente 60,75% da matriz energética brasileira, segundo informações da ANEEL (2019), sendo considerada uma importante forma de geração de energia elétrica, por ser uma fonte de energia renovável, ter um baixo custo de produção e possuir um alto rendimento em comparação a outras fontes de geração.

No caso de uma turbina hidráulica, o rendimento é uma variável importante para avaliação de uma usina hidrelétrica. É aplicável tanto na fase da aquisição da turbina, como no processo de acompanhamento de seu desempenho no decorrer de sua vida útil. Através do rendimento, é possível verificar se as características do equipamento que está sendo adquirido estão de acordo com as que foram contratadas pelo cliente. Na fase de operação é possível verificar o comportamento da máquina ao longo do tempo porque, devido a desgastes e outros fatores, o equipamento tende a perder eficiência. Entre os tipos de ensaios de rendimento, o *Index Test*, ou Ensaio de Rendimento Relativo, é um dos mais utilizados. Neste método, os valores obtidos do rendimento são calculados com base no valor de rendimento máximo garantido pelo projeto da turbina.

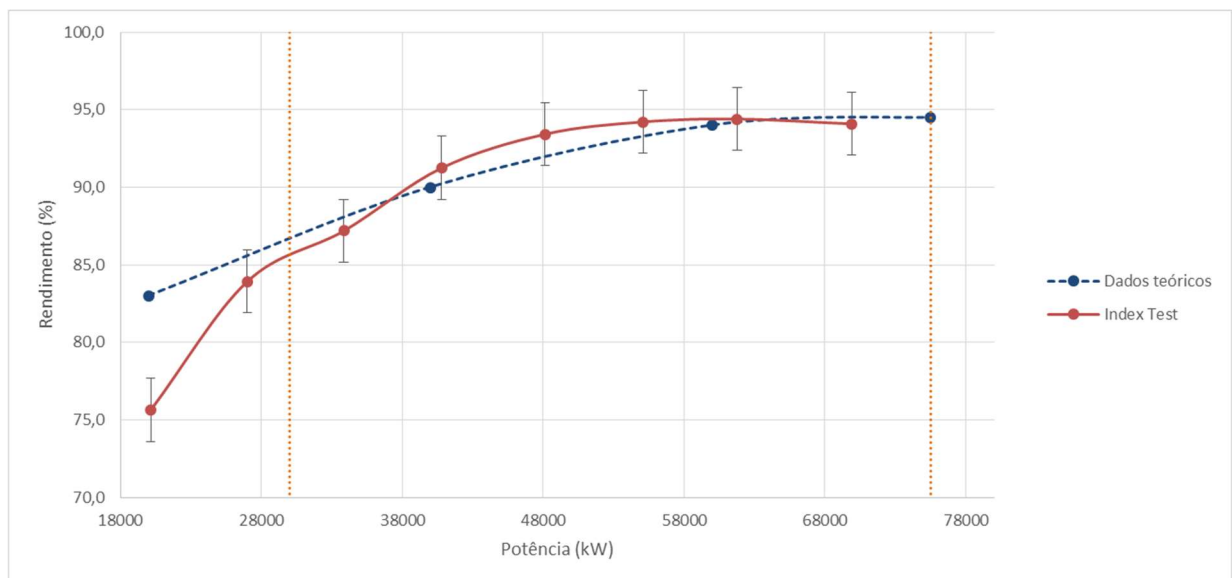
As turbinas hidráulicas do tipo Kaplan constituem um dos principais tipos de turbinas utilizados em hidrelétricas. Sua principal característica é possuir pás móveis no rotor, permitindo o ajuste do ângulo das pás para diferentes vazões, controladas pelo regulador de velocidade em função da abertura do distribuidor, e com isso obter o melhor rendimento para uma grande faixa de operação. Durante a operação da turbina, a abertura das pás do rotor depende da abertura do distribuidor, e este valor é determinado pela curva de conjugação. A curva de conjugação é uma combinação entre a abertura do distribuidor e das pás do rotor para diferentes quedas líquidas, e é obtida através de ensaios de rendimento.

Para o caso das turbinas Kaplan, o ensaio é realizado em 2 etapas. Na primeira etapa é feito o ensaio no modo Oncam, em que é realizada uma tomada de carga com a turbina no modo conjugado para obter a curva de rendimento da turbina e levantar a curva de conjugação utilizada no regulador de velocidade. No modo

conjugado, o regulador de velocidade ajusta o ângulo das pás do rotor em função da abertura do distribuidor. Durante este processo, é realizada a medida da potência gerada, da pressão diferencial entre a entrada e saída da turbina, e valores da pressão na adução e sucção para o cálculo do rendimento. A curva de rendimento obtida no ensaio é comparada com a curva de rendimento obtida a partir do diagrama de colina da turbina, e assim, verificar se este equipamento está operando de acordo com o projeto considerando a incerteza de medição.

A FIGURA 1 mostra um exemplo comparando a curva de rendimento obtida pelo diagrama de colina ou dados teóricos, em azul, e a curva de rendimento obtida pela primeira etapa do ensaio, em vermelho.

FIGURA 1 - EXEMPLO DE CURVA DE RENDIMENTO TEÓRICA E OBTIDA PELO ENSAIO



FONTE: O AUTOR (2019).

Na segunda etapa do ensaio, ou ensaio no modo Offcam, é realizada a operação com o equipamento no modo não conjugado, que consiste em variar o ângulo das pás do rotor e, para cada posição, varia-se a abertura do distribuidor. Este procedimento serve para verificar se a curva de conjugação utilizada pelo regulador de velocidade está otimizada e, caso não esteja, levantar uma nova curva de conjugação com melhor rendimento.

Atualmente, para obter os rendimentos e levantar a curva de conjugação, são utilizadas planilhas com equações implementadas a partir de normas de ensaios de rendimento.

A FIGURA 2, mostra a planilha principal, utilizada nas duas etapas do ensaio, que calcula o rendimento da turbina e as variáveis intermediárias. Nesta planilha, são utilizadas como entradas os valores do nível montante, nível jusante, abertura do distribuidor, abertura do rotor, pressão de adução, pressão de sucção, pressão diferencial e potência gerada. Estas variáveis são inseridas nas colunas J, K, M, N, O, Q, U e AB respectivamente. A coluna AF apresenta os valores dos rendimentos e as outras colunas as variáveis intermediárias.

FIGURA 2 - PLANILHA PRINCIPAL UTILIZADA PARA CÁLCULO DE RENDIMENTO

	B	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF									
7		Dados da Usina:																												
8		diâmetro de entrada da turbina:					Áreas adotadas cf relatório ensaio do fabricante:																				$Q = K \cdot \sqrt{\Delta h} \text{ m}^3/\text{s-para}$			
9		área de entrada:					UG13	relatório	292,21			217,73			m		m ³ /s													
10		área de saída da sucção com c					17,985	m	4 pás	idem	254,026		222,728		m ²		mca	20,4	2%			$Q_p = P_t / \rho \cdot g \cdot H_r$								
11		gravidade no local: $9,7803(1+0,0053 \text{ sen}^2\phi) - 0,000003 \cdot Z$																												
12		massa específica da água a 15,00 graus Celsius $\rho = 995,00 \text{ kg/m}^3$																												
13		latitude: - 8 GRAUS ;45 MIN																												
14		a1=altura do transd entrada em relação ao centro da turbina e cota da linha de centro (medido com											12,793		m			34,1	manm	encontrado:										
15		cota de inst da turbi 34,1 manm																												
16		2-INDEX TEST DA UG#13-4 PÁS-GG2 - PLANILHA DE VALORES LIDOS E CALCULADOS-23/07/2019																												η_{rel} ou
17	Patamar	hora	NM	NJ	Hg	ab. Distr.	ab rotor	P1	P1	P2	P2	Hn	Hn2	delta h	Qt	Ph	Pg	rend ger	Peixo	Pe/raiz	rend									
18	kW	local (-1h)	msnm	msnm	mca	%	%	bar	mca	bar	mca	mca	mca	mbar	m ³ /s	kW	kW	pu	kW	delta h	turb-pu									
19	38000	9:28	70,47	49,02	21,45	43,94	2,91	2,287	23,502	0,229	2,35328	21,3771	21,3301	7,73	210,795	43753,6	38450	0,979	39274,77	14126,2	0,89763									
20	45000	9:37	70,47	49,02	21,45	49,56	9,41	2,286	23,4917	0,229	2,35328	21,3676	21,3168	10,48	245,443	50913,5	45215	0,98	46137,76	14252	0,90620									
21	52000	9:43	70,47	49,02	21,45	55,31	15,9	2,285	23,4814	0,229	2,35328	21,3582	21,3028	13,83	281,956	58449,2	52750	0,983	53662,26	14429,7	0,91810									
22	59000	9:50	70,47	49,02	21,45	59,17	22,91	2,283	23,4609	0,225	2,31217	21,3397	21,3195	17,25	314,894	65328,6	59488	0,984	60455,28	14555,9	0,92540									
23	66000	9:55	70,47	49,02	21,45	62,61	29,93	2,280	23,43	0,229	2,35328	21,3103	21,2431	21,28	349,748	72299,4	66315	0,9845	67359,07	14601,9	0,93167									
24	74000	10:03	70,47	49,02	21,45	66,28	37,88	2,278	23,4095	0,231	2,37383	21,2825	21,1962	26,46	390	80442,4	74370	0,9866	75380,09	14654,2	0,93707									

FONTE: O AUTOR (2019).

Na segunda etapa do ensaio, os valores da abertura das pás do rotor, abertura do distribuidor, potência do gerador e o rendimento da turbina, obtido pela planilha mostrada na FIGURA 2, são inseridos na planilha apresentada na FIGURA 3. Esta planilha indica, para cada posição das pás do rotor, os valores de maior rendimento e a abertura do distribuidor que corresponde a este rendimento. Esta planilha é utilizada para levantar a nova curva de conjugação. A FIGURA 3 apresenta um exemplo com dados obtidos do ensaio de rendimento realizado na unidade geradora 30 da Hidrelétrica Santo Antônio.

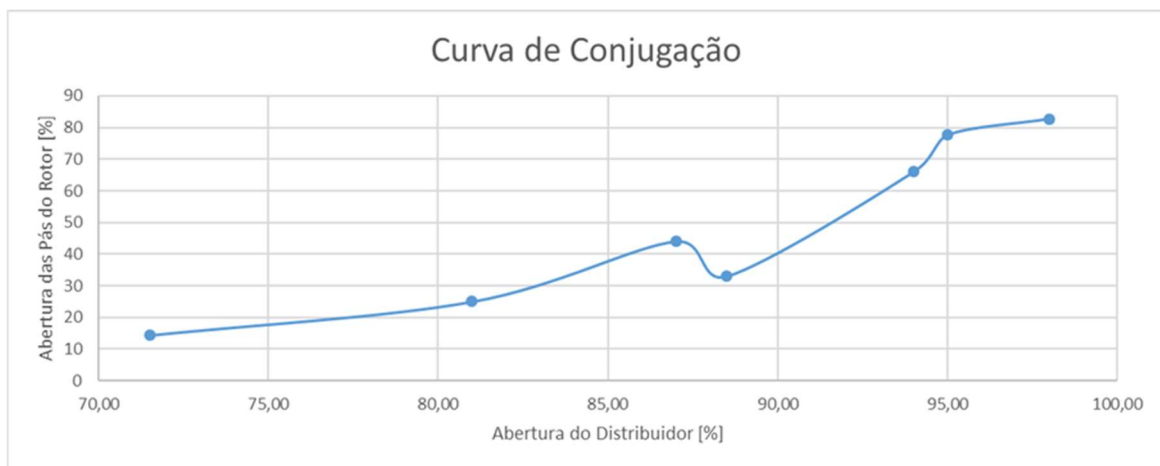
FIGURA 3 - DADOS DE ENSAIO DA UNIDADE GERADORA 30 DA HIDRELÉTRICA SANTO ANTÔNIO

Abertura das Pás do Rotor [%]	Abertura do Distribuidor [%]	Potência do Gerador [kW]	Rendimento da Turbina [%]	Maior Rendimento da Turbina [%]	Abertura do Distribuidor para o maior rendimento [%]
14,37	59,00	20820	61,16	65,28	71,50
	64,00	22850	62,13		
	66,50	23650	63,21		
	69,00	24640	64,96		
	71,50	25910	65,28		
25,00	76,50	26340	64,40	62,90	81,00
	73,50	29529	61,09		
	76,00	30870	61,37		
	78,50	32060	62,55		
33,00	81,00	32690	62,90	63,97	88,50
	83,50	32660	61,99		
	75,10	30530	57,43		
	77,50	32290	57,97		
	80,00	34370	60,21		
44,00	82,50	34910	61,06	64,08	87,00
	88,50	36810	63,97		
	91,50	37090	63,36		
	80,00	35880	41,82		
66,00	83,00	38490	60,62	63,15	94,00
	87,00	40970	64,08		
	92,00	41860	63,43		
	82,00	36670	49,37		
	87,00	41400	53,55		
77,62	90,00	45090	56,92	63,54	95,00
	94,00	51120	63,15		
	96,00	51270	59,99		
	85,00	40050	48,67		
82,70	90,00	48290	54,90	59,27	98,00
	95,00	54650	58,17		
	98,00	55590	59,28		
	90,00	46570	51,31		
	98,00	57640	59,27		
	100,00	58210	58,70		

FONTE: O AUTOR (2019).

A partir dos dados da planilha da FIGURA 3 é gerada a nova curva de conjugação, utilizando as aberturas das pás do rotor, coluna à esquerda, em função da abertura do distribuidor com valores de maiores rendimentos encontrados, coluna à direita. A FIGURA 4 apresenta a curva de conjugação gerada a partir dos dados de ensaio da Unidade Geradora 30.

FIGURA 4 - CURVA DE CONJUGAÇÃO DA UNIDADE GERADORA 30 PARA QUEDA LÍQUIDA DE 11,3 METROS



FONTE: O AUTOR (2019).

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma ferramenta computacional para processar e analisar dados obtidos de ensaios de rendimento de turbinas hidráulicas do tipo Kaplan, fornecendo informações em tempo real do rendimento e da curva de conjugação utilizada no regulador de velocidade visando redução do custo do serviço e do consumo de água para geração.

Este trabalho traz os seguintes objetivos específicos:

- Apresentar métodos utilizados para o cálculo de rendimento de turbinas hidráulicas do tipo Kaplan;
- Utilizar o método de regressão polinomial de terceira ordem para obter o melhor rendimento da turbina para uma determinada abertura das pás do rotor e distribuidor;

- Definir uma linguagem de programação para desenvolver a ferramenta computacional e implementar lógicas e equações de acordo com os métodos utilizados para ensaios de rendimento;
- Realizar ensaios de rendimento, na Hidrelétrica Santo Antônio, para coleta de dados e teste da ferramenta. A escolha da usina foi pelo fato de estar previsto ensaios de rendimento na UHE Santo Antônio, durante o mesmo período proposto no cronograma para o desenvolvimento do projeto do mestrado.
- Analisar os resultados obtidos pela ferramenta computacional e comparar com os resultados do ensaio utilizando as planilhas das FIGURA 2 e FIGURA 3.

1.3 JUSTIFICATIVA

Atualmente, os cálculos para a curva de rendimento e curva de conjugação são realizados de forma manual ou através de planilhas, como se pode observar na FIGURA 2 e FIGURA 3. As únicas ferramentas computacionais comumente utilizadas são aplicadas para a aquisição e processamento dos dados de ensaios, porém não estão disponíveis no mercado, pois são desenvolvidas de acordo com a necessidade de quem realiza os ensaios. A desvantagem da utilização de planilhas, ou realizar o cálculo de forma manual, é o tempo para obter o resultado e o erro humano que pode ocorrer durante essa operação, fazendo com que se despenda um tempo excessivo para obter os valores corretos, resultando em um aumento no custo do serviço executado.

Para cada ensaio de rendimento, as quantidades de pontos adquiridos são diferentes sendo necessário ajustar as planilhas antes da realização do serviço. Após o ensaio, também são realizadas alterações nas planilhas para o processamento dos dados de ensaio, geração de gráficos e elaboração do relatório. O tempo médio utilizado para todo esse processo após o ensaio é de 40 horas. Os detalhes do ensaio são apresentados no APÊNDICE I.

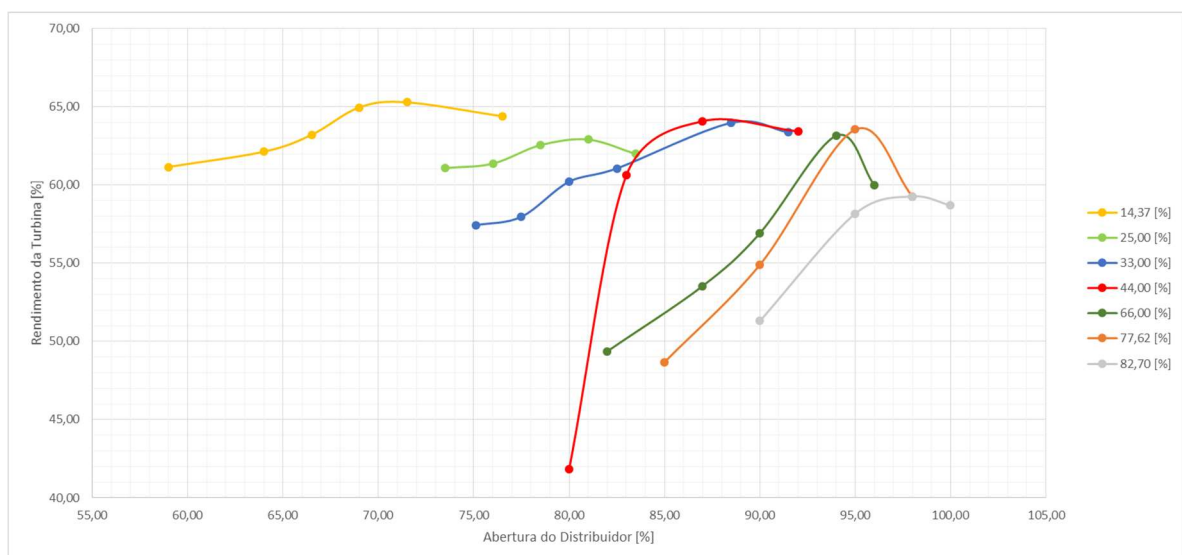
Um fato constatado é que, hoje em dia, para o processo de ensaio e pós ensaio é necessário o acompanhamento de um consultor que possui anos de experiência na área de ensaios de rendimento. Ele é quem orienta todo o procedimento do ensaio e acompanha o processamento, análise dos dados e manuseio com as planilhas. Uma desvantagem da utilização da consultoria é que todo

o conhecimento fica restrito a ele ou a pessoa que o acompanha, e isso pode ser um problema para a empresa, uma vez que, sem este consultor e o funcionário que acompanha no serviço, perde-se todo esse conhecimento. Outro fato é que o valor da hora pela consultoria é alto.

Um outro aspecto verificado durante a realização dos ensaios é que, utilizando as planilhas para obter a nova curva de conjugação, não se considera o ponto de maior rendimento da máquina e sim o de maior rendimento encontrado nos dados do ensaio. Este fato pode ser verificado analisando os dados apresentados pela FIGURA 3. A partir destes dados, construindo-se curvas de rendimento da turbina em função da abertura do distribuidor para cada posição das pás do rotor, como apresentado na FIGURA 5, verifica-se que, para cada curva, pode haver uma região com um rendimento maior que o ponto determinado pelo ensaio.

Analisando a FIGURA 5, na curva à direita, na cor laranja, considera-se a abertura das pás em 77,62% e a abertura do distribuidor variando entre 85 e 98%. Nesse caso, utilizando a planilha mostrada na FIGURA 3 para gerar a curva de conjugação, o maior rendimento da turbina se obtém com abertura do distribuidor em 95%.

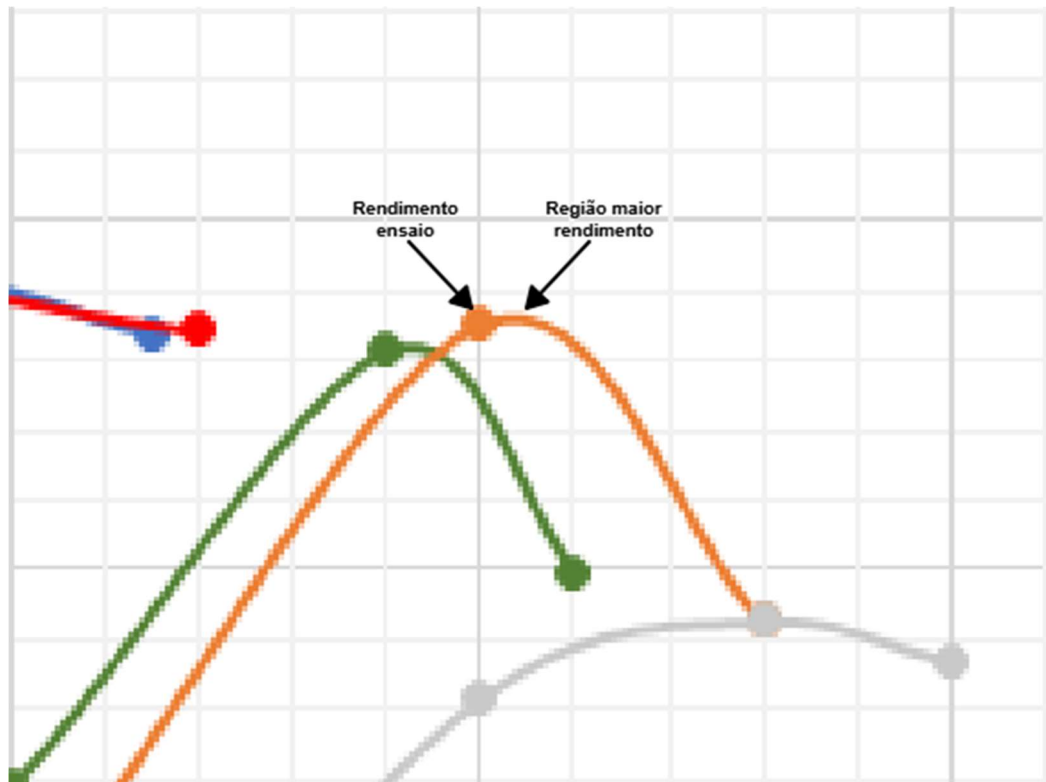
FIGURA 5 - CURVAS DE RENDIMENTO EM FUNÇÃO DA ABERTURA DO DISTRIBUIDOR PARA DIFERENTES ABERTURAS DAS PÁS DO ROTOR



FONTE: O AUTOR (2019).

A FIGURA 6 apresenta região da FIGURA 5 ampliada, mostrando com detalhes a curva da abertura das pás do rotor para 77,62%, e indicando o ponto do rendimento encontrado pelo ensaio e a região com maior rendimento. O impacto de utilizar o rendimento encontrado pelo ensaio, seria de estar consumindo uma maior vazão de água para gerar a mesma potência.

FIGURA 6 - REGIÃO COM RENDIMENTO MAIOR QUE O PONTO DETERMINADO PELO ENSAIO



FONTE: O AUTOR (2019).

A proposta deste projeto é desenvolver uma ferramenta computacional que indique os valores de rendimento e curva de conjugação, de acordo com as normas para ensaios de rendimento, substituindo a utilização de planilhas e, como resultado, reduzir o tempo gasto na manipulação das planilhas.

Além disso, através de métodos de otimização, a ferramenta indicará um ponto de operação com o melhor rendimento da turbina durante o ensaio, podendo assim testar e validar esse ponto sugerido pela ferramenta durante este procedimento. A vantagem da utilização da ferramenta computacional, em relação às planilhas, é obter uma curva de conjugação para operar a unidade geradora em uma faixa com maior rendimento da turbina.

O resultado deste trabalho tem como benefício otimizar a execução do serviço de ensaio de rendimento e a operação de unidades geradoras com turbinas do tipo Kaplan porque, diminuindo o tempo gasto com a manipulação das planilhas, reduz-se o valor de recurso humano gasto no serviço e, utilizando uma curva de conjugação com um maior rendimento da turbina, reduz o consumo de água e conseqüentemente obtém-se um incremento operacional e financeiro da usina.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada em seis capítulos. Neste capítulo, é apresentado o contexto no qual ensaios de rendimento são aplicados, assim como objetivo e justificativa para o desenvolvimento da ferramenta computacional.

O segundo capítulo é destinado à exposição da fundamentação teórica, onde são apresentados os conceitos de turbinas hidráulicas Kaplan, e equacionamentos para ensaio de rendimento relativo ou *Index Test*.

O terceiro capítulo é dedicado à apresentação do estado da arte, considerando o levantamento de temas relacionados às turbinas Kaplan e aos ensaios de rendimento em turbinas hidráulicas.

No quarto capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento dos ensaios de rendimento e da ferramenta computacional, apresentando diagramas utilizados para a implementação deste programa.

No capítulo cinco são apresentados os resultados do ensaio de rendimento realizado na UHE Santo Antônio, utilizando a ferramenta computacional, para teste e validação deste sistema, e comparando os resultados obtidos por ele com resultados obtidos utilizando as planilhas.

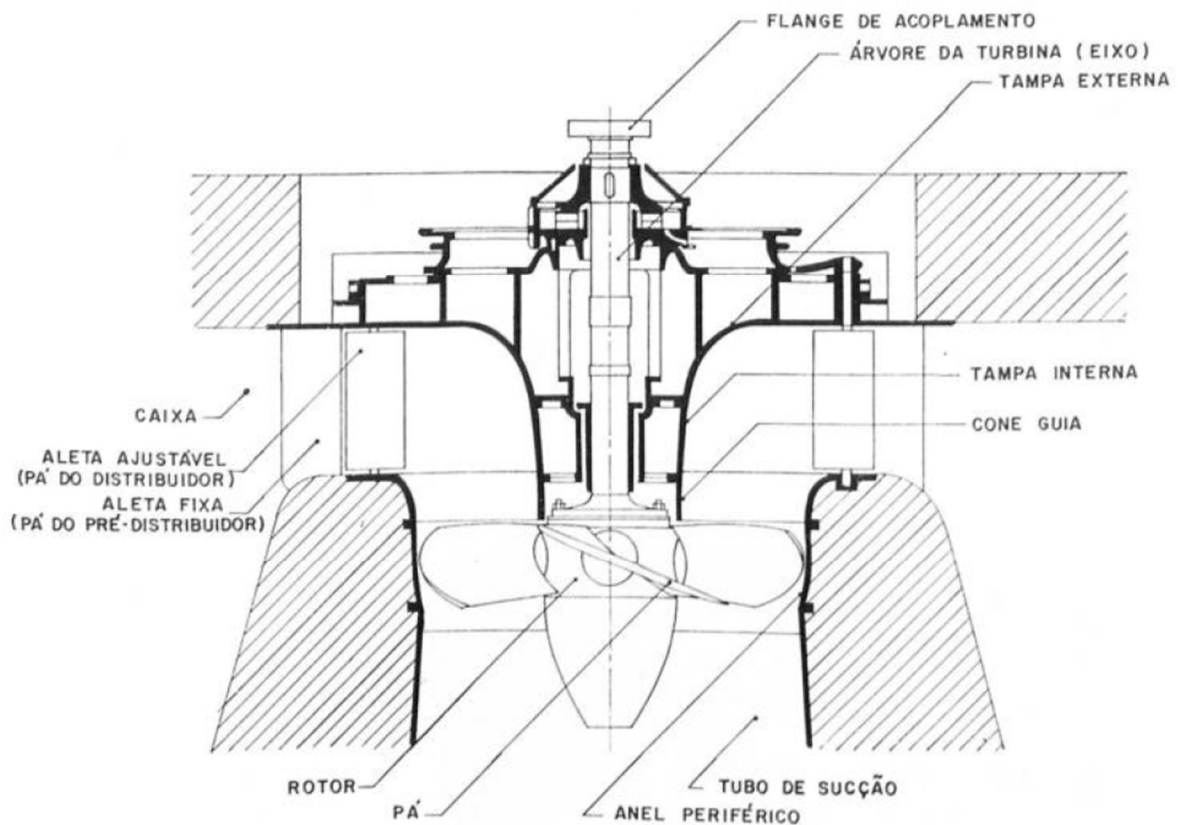
No último capítulo, são apresentadas as conclusões desse trabalho assim como sugestões para trabalhos futuros e as limitações do presente estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TURBINAS KAPLAN

A turbina Kaplan foi inventada pelo engenheiro Victor Kaplan em 1912, sendo concebida a partir de turbinas axiais a hélice, segundo Macintyre (1983). Foi desenvolvida para operar em instalações com pequenas e médias quedas, e grandes vazões. Possui como principal característica a capacidade de movimentar as pás do rotor, podendo assim, ajustar-se para obter o melhor rendimento em função da vazão de água, esta controlada pela abertura do distribuidor. A FIGURA 7 apresenta uma turbina Kaplan e seus principais componentes.

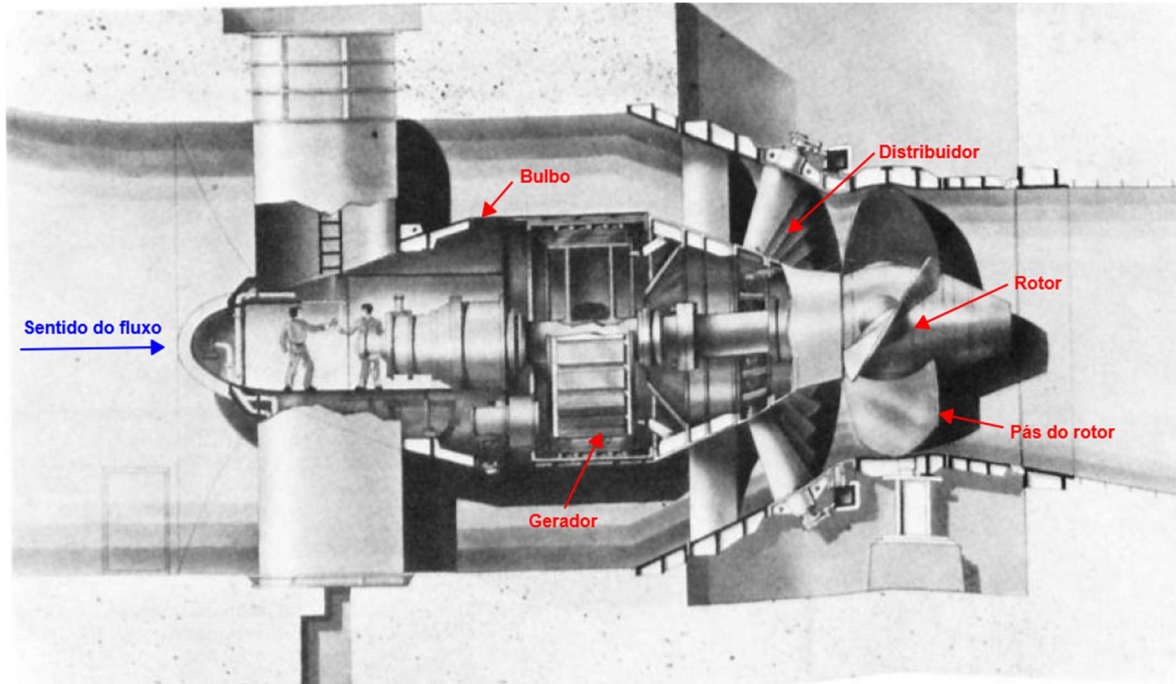
FIGURA 7 - TURBINA KAPLAN E PRINCIPAIS COMPONENTES



FONTE: MACINTYRE (1983).

A turbina tipo Bulbo, é uma variação da turbina Kaplan, tendo como diferenças o invólucro (bulbo onde encontra-se o gerador) imerso na adução e a posição da turbina, sendo esta instalada na horizontal enquanto a Kaplan na vertical. A FIGURA 8 apresenta uma turbina Bulbo.

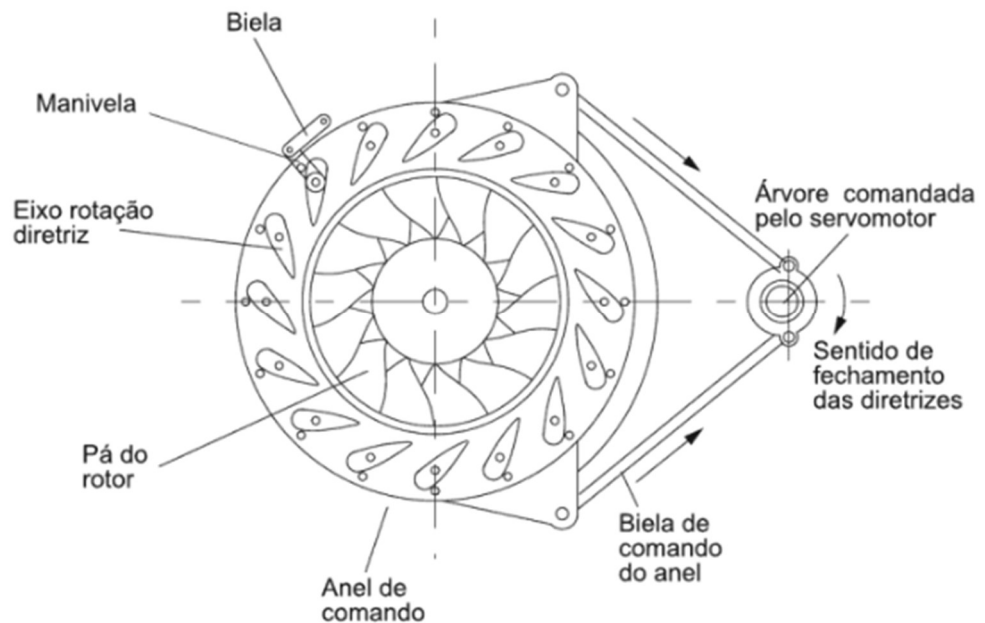
FIGURA 8 - TURBINA BULBO



FONTE: MACINTYRE (1983).

O distribuidor é um sistema de pás móveis que controla a vazão de água que passa pela turbina. Este sistema é composto por um mecanismo de bielas e manivelas que movimentam as pás do distribuidor. Este mecanismo é acionado através de um servomotor do regulador de velocidade, como mostrado pela FIGURA 9.

FIGURA 9 - DETALHES DO DISTRIBUIDOR



FONTE: VIANA (2012).

2.2 ENSAIO DE RENDIMENTO INDEX TEST

O *Index Test* é um ensaio de rendimento de turbinas hidráulicas, em que se determina o rendimento da turbina em toda a sua faixa de operação. Os valores obtidos do rendimento são relativos, já que são calculados tendo como base valores de referência como, por exemplo, valor de rendimento e vazão de projeto.

A queda bruta (H_B) é determinada pela diferença entre o nível de água a montante (z'_1) e a jusante (z'_2), dada pela Equação 1.

$$H_B = z'_1 - z'_2 \quad \text{EQUAÇÃO 1}$$

A queda líquida (H_L) é a diferença entre a queda bruta e as perdas hidráulicas que ocorrem no circuito da adução da turbina, porém como essas perdas não são medidas, a queda líquida é calculada pela Equação 2.

$$H_L = \frac{P_1 - P_2}{\rho g} + z_1 - z_2 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} - \frac{Q^2}{2gA_2^2} \quad \text{EQUAÇÃO 2}$$

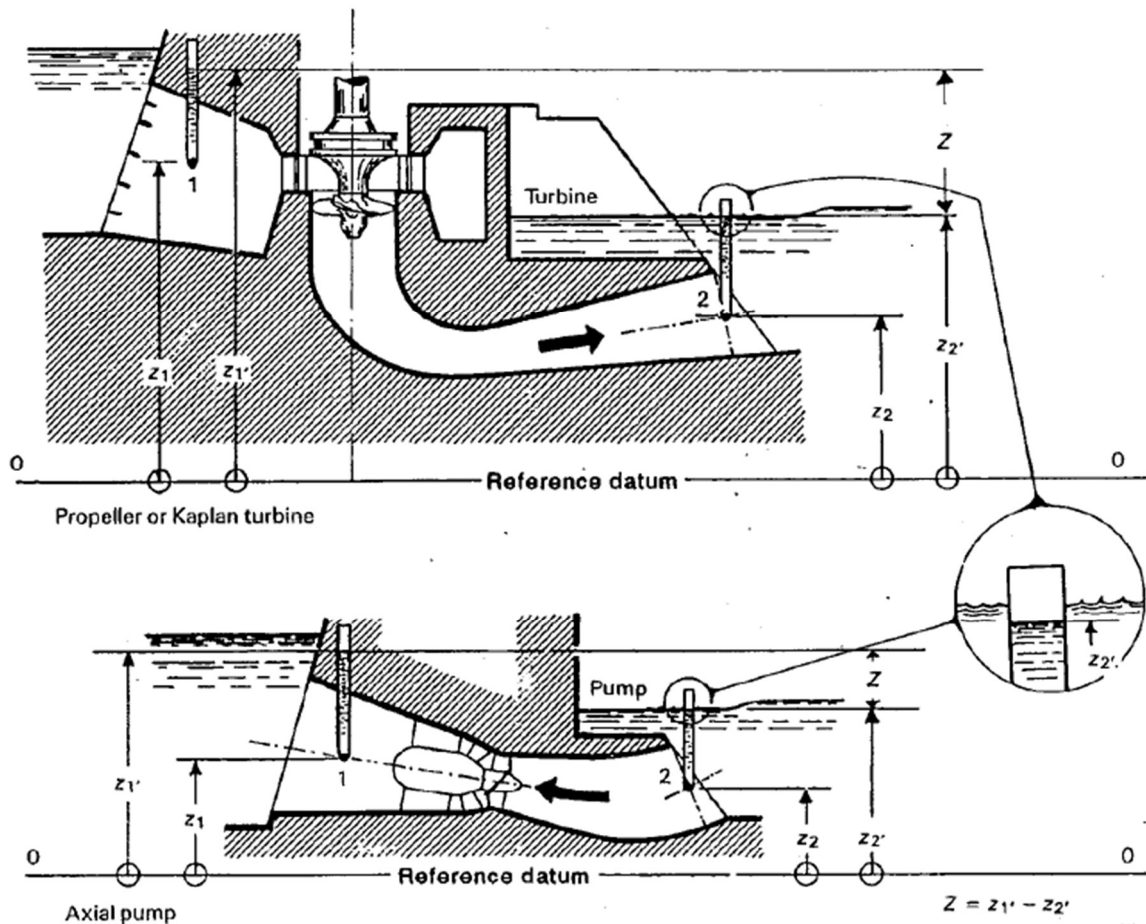
Onde,

- P_1 - Pressão na entrada da caixa espiral;
- P_2 - Pressão na saída da caixa espiral;
- z_1 - Nível de instalação do sensor de pressão na adução;
- z_2 - Nível de instalação do sensor de pressão na sucção;
- A_1 - Área da seção de entrada da caixa espiral;
- A_2 - Área da seção de saída da caixa espiral;
- ρ - Densidade da água;
- g - Aceleração da gravidade;
- Q - Vazão turbinada.

A localização dos sensores de nível montante e jusante, e nível dos sensores de pressão na adução e sucção, é apresentada pela FIGURA 10. Como as turbinas Bulbo não possuem caixa espiral e são instaladas na horizontal, os pontos de instrumentação podem ser em localizações diferentes em relação a turbinas Kaplan.

Na imagem superior é mostrada a localização da instrumentação de uma turbina Kaplan e na imagem inferior para turbina Bulbo.

FIGURA 10 - LOCALIZAÇÃO DOS NÍVEIS DE INSTALAÇÃO DOS SENSORES E PRESSÃO DE ADUÇÃO E SUCÇÃO E DOS NÍVEIS MONTANTE E JUSANTE



FONTE: IEC 60041 (1991).

A potência de saída da turbina (P_T) é obtida pela relação entre a potência do gerador (P_G) e o rendimento do gerador (η_G), calculada pela Equação 3.

$$P_T = \frac{P_G}{\eta_G} \quad \text{EQUAÇÃO 3}$$

Para obter o rendimento da turbina (η_T) o cálculo utilizado é dado pela Equação 4.

$$\eta_T = \frac{P_T}{\rho g Q H_L} \quad \text{EQUAÇÃO 4}$$

Onde,

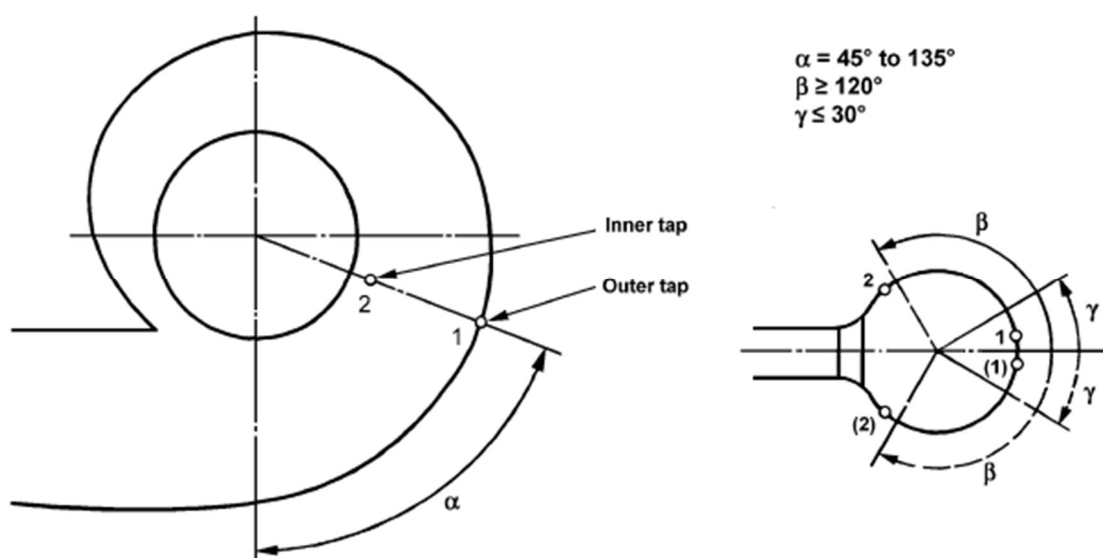
- P_T - Potência de saída da turbina;
- ρ - Densidade da água;
- g - Aceleração da gravidade;
- Q - Vazão turbinada;
- H_L - Queda líquida.

No ensaio de rendimento *Index Test*, para determinar a vazão, é utilizado o método de Winter-Kennedy (WK). Este método utiliza a diferença de pressão estática entre a parte interna e externa da caixa espiral, devido à força centrífuga que atua no fluxo do líquido na curva da caixa espiral, segundo Basurto-Pensado et al. (2012).

As principais características deste método é que utiliza equipamentos de baixo custo, possui precisão de 1 a 1,2% e, para o cálculo, utiliza a diferença de pressão estática entre duas tomadas de pressão da turbina.

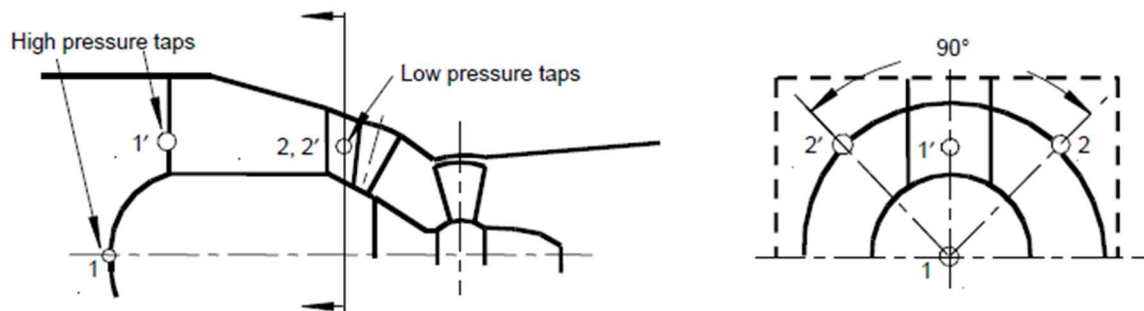
Para turbinas Kaplan, que possuem caixa espiral, os pontos das tomadas são indicados na FIGURA 11. Como as turbinas Bulbo não possuem caixa espiral, os pontos estão localizados entre a adução e as pás do rotor, como indicados na FIGURA 12.

FIGURA 11 - LOCALIZAÇÃO DAS TOMADAS DE PRESSÃO PARA WINTER-KENNEDY EM TURBINAS KAPLAN



FONTE: IEC 62006 (2010).

FIGURA 12 - LOCALIZAÇÃO DAS TOMADAS DE PRESSÃO PARA WINTER-KENNEDY EM TURBINAS BULBO



FONTE: IEC 62006 (2010).

Este método também necessita de dados do diagrama de colina para determinar o fator (K) que correlaciona a vazão com a pressão diferencial. Esse fator ou coeficiente de WK é dada pela Equação 5:

$$K = \frac{Q}{(\Delta P)^n} \quad \text{EQUAÇÃO 5}$$

Onde (Q) representa a vazão, (ΔP) a pressão diferencial entre as tomadas de pressão, e (n) o expoente da pressão, com valor entre 0,48 a 0,52 de acordo com a norma IEC 60041.

2.3 REGRESSÃO POLINOMIAL

Análise de Regressão é um método estatístico que permite encontrar uma relação entre uma variável dependente e variáveis independentes. Esse método é utilizado para obter uma equação que melhor representa um conjunto de dados. Entre as principais técnicas deste método estão:

- Regressão linear;
- Regressão polinomial;
- Regressão linear múltipla;
- Regressão por mínimos quadrados;
- Regressão não linear.

Regressão polinomial é um método utilizado para ajustar uma equação polinomial de segunda ordem ou mais, de forma que obtenha o melhor ajuste de um

determinado conjunto de dados, minimizando o quadrado dos erros. Segundo Amos Gilat (2008), o polinômio tem a seguinte forma:

$$f(x) = a_n \cdot x^n + a_{n-1} \cdot x^{n-1} + \dots + a_1 \cdot x + a_0 \quad \text{EQUAÇÃO 6}$$

Onde n é o grau ou a ordem do polinômio, a é o coeficiente da equação e x a variável.

Para verificar se uma equação pode representar de forma aproximada um conjunto de dados, é utilizado o cálculo do erro ou resíduo, que é a diferença entre cada ponto do conjunto de dados e o valor da equação. A partir da diferença de cada ponto, obtém-se o erro total, que de acordo com Amos Gilat (2008), é dada por:

$$E = \sum_{i=1}^n [y_i - (a_n \cdot x_i^n + a_{n-1} \cdot x_i^{n-1} + \dots + a_1 \cdot x_i + a_0)]^2 \quad \text{EQUAÇÃO 7}$$

Para determinar os coeficientes da equação, deve-se calcular as derivadas parciais do erro em relação a cada coeficiente (a_n, a_{n-1}, \dots, a_0), igualando os resultados a zero, como apresentada pela Equação 8 e Equação 9.

$$\frac{\partial E}{\partial a_0} = -2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - a_n \cdot x_i^n + a_{n-1} \cdot x_i^{n-1} + \dots + a_1 \cdot x_i + a_0) = 0 \quad \text{EQUAÇÃO 8}$$

.

.

.

$$\frac{\partial E}{\partial a_n} = -2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - a_n \cdot x_i^n + a_{n-1} \cdot x_i^{n-1} + \dots + a_1 \cdot x_i + a_0) \cdot x_i^n = 0 \quad \text{EQUAÇÃO 9}$$

A partir das equações das derivadas parciais obtidas entre a Equação 8 e Equação 9, obtém-se um sistema com $(n + 1)$ equações em função das incógnitas (a_n, a_{n-1}, \dots, a_0). Resolvendo-se este sistema, obtém-se os valores dos coeficientes do polinômio.

3 ESTADO DA ARTE

Para este trabalho, foram realizadas buscas na base de dados IEEE, Emerald e Science Direct utilizando as seguintes palavras-chave:

- Kaplan Turbine;
- *Performance Test*;
- Winter-Kennedy;
- *Index Test*;

Vários trabalhos sobre turbinas Kaplan e teste de performance foram encontrados, porém não foi encontrado nenhum trabalho relacionado a ferramenta computacional para este tipo de ensaio.

Atta et al. (2014) realizaram um trabalho que sugere um novo algoritmo de busca extrínseca baseado em perturbações senoidais e baseado no fasor da saída. Este algoritmo é utilizado para gerar os dados necessários para construir e corrigir a curva de conjugação. Simulações são apresentadas mostrando a aplicabilidade dos métodos propostos.

Dunca et al. (2015) mostram uma alternativa ao método de Gibson, para estimar a vazão de uma turbina hidráulica. O método propõe um algoritmo genético que inclui um procedimento de integração para as equações do golpe de aríete, usando o método das características. As variáveis de decisão são representadas pela descarga do regime de estado estacionário antes do fechamento da válvula e do fator de atrito do tubo. Este método foi verificado por um experimento numérico e depois validado com os dados medidos em um experimento de laboratório na NTNU, Noruega.

Liu et al. (2015) fazem uma revisão de um conjunto de equações empíricas para determinar a máxima eficiência e a forma da curva de eficiência em função da queda líquida nominal, vazão nominal e outros parâmetros principais do projeto. Este trabalho possui um foco maior nos fatores de projeto, que poderiam influenciar no valor da eficiência geral da turbina. Para quantificar os efeitos desses fatores, os autores investigaram a influência da rugosidade e das folgas na vazão interna de vazamento.

Božić; Benišek (2016) mostram o perfil e as perdas secundárias de energia no rotor da turbina Kaplan através de simulações numéricas, usando dois modelos de turbulência, e pelos dados experimentais disponíveis das características dos perfis das pás do rotor. A pesquisa realizada fornece uma contribuição para melhor determinação de perdas secundárias na prática de engenharia, suas distribuições e participações nas perdas totais de turbina para uma ampla gama de modos de operação. De acordo com a metodologia proposta e os resultados obtidos, a melhoria da fórmula existente tem sido feita, permitindo assim uma quantificação mais precisa das perdas secundárias no rotor da turbina hidráulica axial.

Lanzersdorfer; Hackl (2018) apresentam uma alternativa medir eficiência de máquinas hidráulicas, utilizando o método de eficiência termodinâmica. Este método pode ser resolvido de forma iterativa ou pelo uso de soluções analíticas. Para o trabalho apresentado, foi utilizada uma extensão das soluções analíticas.

Abbas; Kumar (2019) realizaram ensaios de rendimento de turbinas hidráulicas utilizando cálculos de incerteza de medição para vários instrumentos utilizados no ensaio. Para este estudo, foi avaliado o rendimento para 16 pontos de operação e, para cada ponto, foram calculadas a incerteza total para a medição da vazão e eficiência, onde o menor valor da incerteza foi encontrado no ponto de maior eficiência. No trabalho, uma correlação para a estimativa da incerteza na medição da eficiência foi desenvolvida com um erro de $\pm 9\%$.

Menarin et al. (2019) analisaram dinamicamente os efeitos que as pás do rotor da turbina Kaplan causam na eficiência e na vazão durante respostas transitórias. Dados de campo foram coletados de quatro turbinas diferentes. As características estáticas para vazão e eficiência foram identificadas. Os modelos são apresentados em valores normalizados para que possam ser reutilizados para representar outras turbinas. Este trabalho contribui significativamente para a modelagem de tais turbinas para análise dinâmica, pois uma representação completa não é fornecida na maioria das ferramentas de modelagem. Isso é discutido com base na resposta do controle de velocidade sob operação isolada, mostrando que o modelo proposto pode fornecer maior precisão na representação de tais turbinas.

4 MATERIAIS E MÉTODO

Neste capítulo, são apresentados os materiais e o método utilizado para o desenvolvimento da ferramenta computacional e para os ensaios de rendimento.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Para o desenvolvimento da ferramenta computacional, foi utilizado o software LabVIEW da National Instruments na versão 2018.

4.1.2 ENSAIOS DE RENDIMENTO

Os principais materiais e equipamentos utilizados para os ensaios de rendimento serão apresentados a seguir:

4.1.2.1 Transdutor de pressão diferencial para Winter-Kennedy

- Marca: Rousemount
- Modelo: 1151
- Faixa de medição: 0 a 0,5 kgf/cm²
- Máximo erro: 0,04%
- Máxima histerese: 0,04%
- Máxima incerteza de medição: 0,12%

4.1.2.2 Transdutor de pressão para tomada da adução

- Marca: Acros
- Modelo: TP-ST18
- Faixa de medição: 0 a 5 kgf/cm²
- Máximo erro: 0,8%
- Máxima histerese: 0,6%
- Máxima incerteza de medição: 0,54%

4.1.2.3 Transdutor de pressão para tomada da sucção

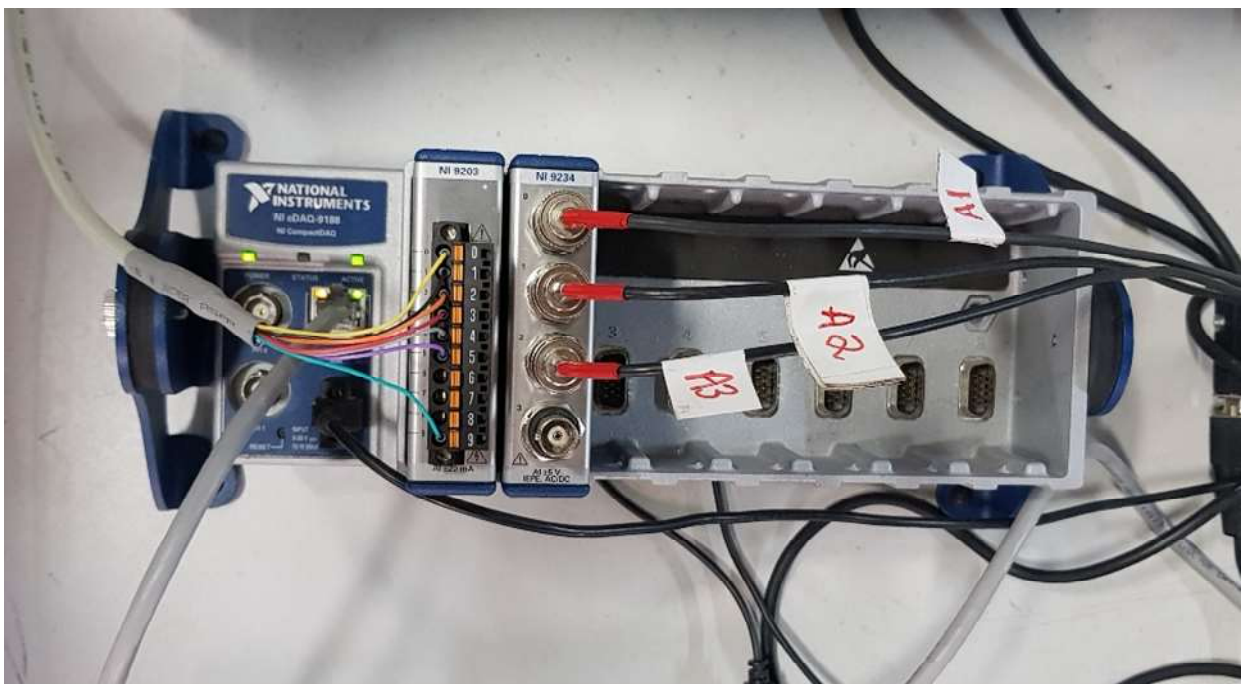
- Marca: Acros
- Modelo: TP-ST18
- Faixa de medição: 0 a 2 kgf/cm²
- Máximo erro: 0,37%
- Máxima histerese: 0,14%
- Máxima incerteza de medição: 0,05%

4.1.2.4 Equipamento para aquisição de dados

Para aquisição das variáveis de pressão de adução, sucção e Winter-Kennedy, foram utilizados equipamentos da National Instruments, apresentados pela FIGURA 13, onde observa-se um chassi para transferência de dados ao computador e um módulo para medir sinais de corrente de 4 a 20 mA.

- Marca: National Instruments
- Chassi: cDAQ 9188
- Módulo: NI9203

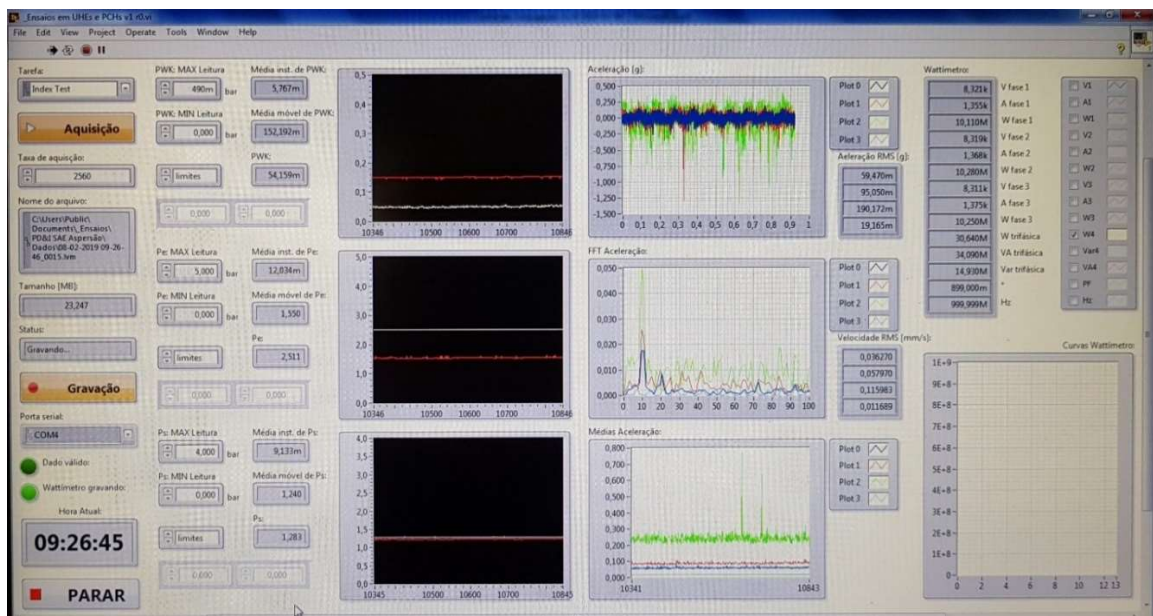
FIGURA 13 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS



FONTE: O AUTOR (2019).

A apresentação dos dados adquiridos pelos equipamentos da National Instruments é realizada por um programa em LabVIEW desenvolvido pelo Lactec, mostrado na FIGURA 14. Os dados de entrada deste programa são correntes de 4 a 20 mA, fornecidas pelo sistema de aquisição para os transdutores da tomada de pressão de adução, sucção e o transdutor de pressão diferencial. Este programa converte os sinais de corrente para pressão, fornecendo os valores das variáveis em bar ou mbar, utilizando para isso dados de calibração dos transdutores. Além disso, possui a função de gravar os dados adquiridos do ensaio. Este programa é de propriedade do Lactec e é utilizado em serviços que necessitam realizar leitura de transdutores de pressão.

FIGURA 14 - PROGRAMA EM LABVIEW UTILIZADO PARA AQUISIÇÃO DOS DADOS

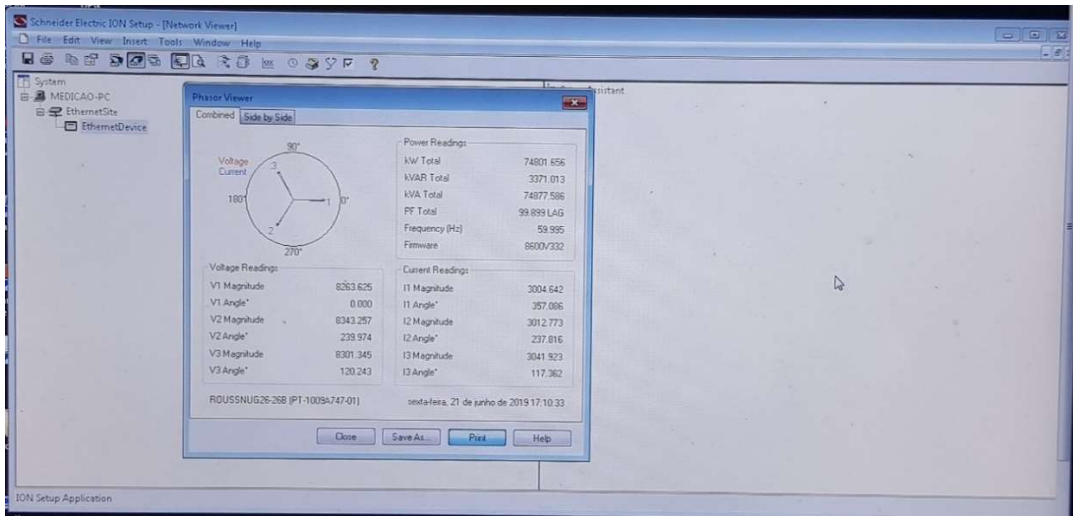


FONTE: O AUTOR (2019).

4.1.2.5 Dados do sistema da usina

O valor da potência ativa do gerador foi obtido diretamente pelo sistema da Schneider Electric Ion Setup, utilizado no medidor de potência, mostrado na FIGURA 15.

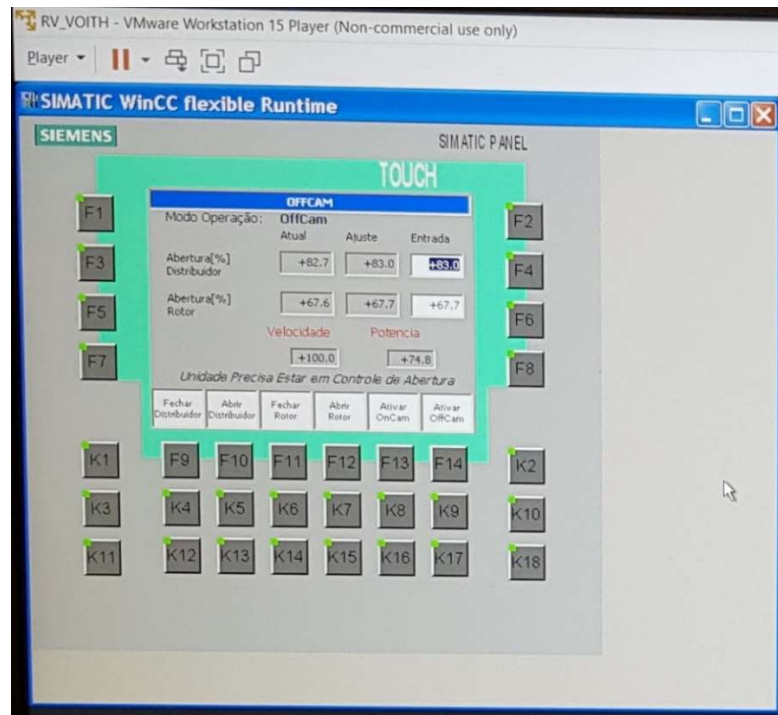
FIGURA 15 - SISTEMA DO MEDIDOR DE POTÊNCIA DO GERADOR



FONTE: O AUTOR (2019).

O controle e a leitura da abertura do distribuidor e do rotor da turbina foi realizado pelo supervisor do regulador de velocidade desenvolvido pela Voith utilizando o SIMATIC WinnCC da Siemens, um sistema de supervisão e aquisição de dados. A interface deste supervisor é apresentada pela FIGURA 16.

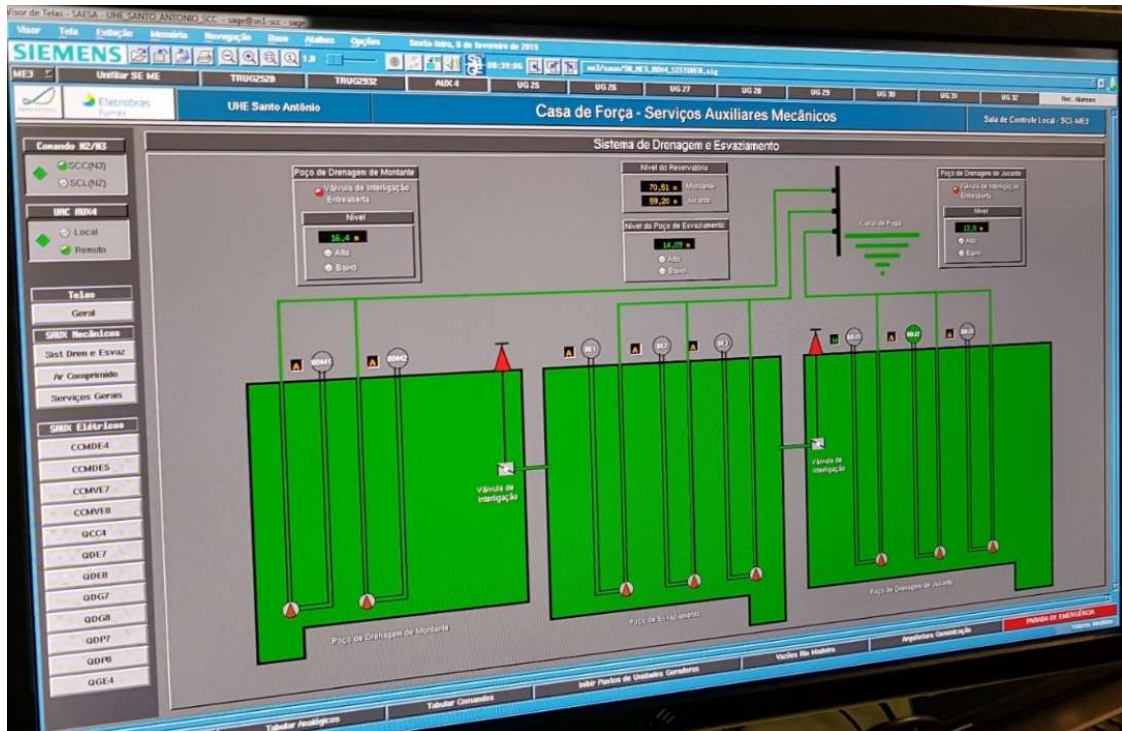
FIGURA 16 - SISTEMA DO REGULADOR DE VELOCIDADE



FONTE: O AUTOR (2019).

Os valores dos níveis montante e jusante foram obtidos pelo supervisório dos serviços auxiliares da usina, e pode ser observado na FIGURA 17.

FIGURA 17 - SISTEMA DOS SERVIÇOS AUXILIARES

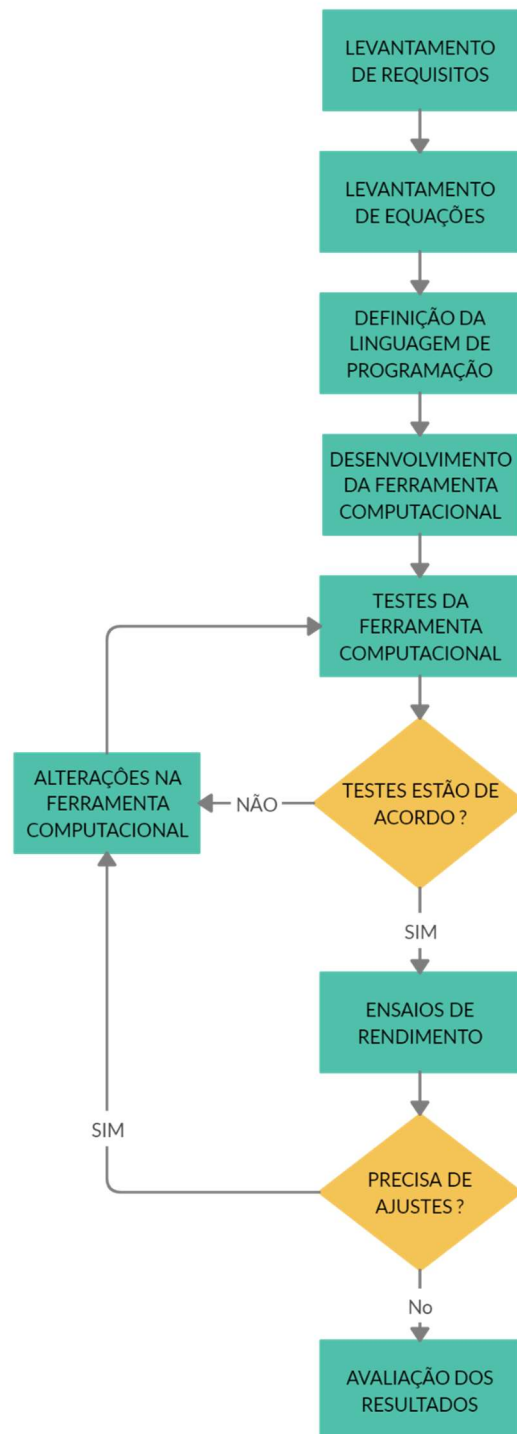


FONTE: O AUTOR (2019).

4.2 MÉTODO

Para o desenvolvimento deste projeto, o método proposto é dividido em 8 etapas como apresentado pela FIGURA 18.

FIGURA 18 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS



FONTE: O AUTOR (2019).

4.2.1 Levantamento de Requisitos

Antes de iniciar o desenvolvimento da ferramenta, foram levantados os requisitos necessários que o sistema deve atender. Abaixo, são apresentados estes requisitos:

- Possibilidade de integração com o sistema de aquisição de dados desenvolvido pelo Lactec;
- Apresentar todos os resultados do ensaio *Index Test* de acordo com cálculos apresentados em normas técnicas para ensaios de rendimento;
- Flexibilidade para configurar parâmetros de projeto da unidade geradora, possibilitando utilizar a ferramenta para outras usinas com turbinas Kaplan;
- Otimizar resultados dos ensaios buscando um melhor rendimento.

4.2.2 Levantamento de Equações

Nesta etapa foram levantadas as equações utilizadas para ensaios de rendimento de turbinas Kaplan, conforme as normas como a CEI / IEC 60041 e CEI / IEC 62006. As equações levantadas para a ferramenta computacional são utilizadas para obter as seguintes variáveis:

- Queda bruta: Equação 1;
- Queda líquida: Equação 2;
- Potência de saída da turbina: Equação 3;
- Rendimento da turbina: Equação 4;
- Constante de Winter-Kennedy: Equação 5.

4.2.3 Definição da Linguagem de Programação

Para o desenvolvimento da ferramenta computacional, foram avaliadas algumas linguagens de programação como MATLAB e Python, porém, foi optado em utilizar o LabVIEW devido à facilidade para uma futura integração com o programa do sistema de aquisição de dados, também desenvolvido em LabVIEW.

O LabVIEW é uma linguagem de programação gráfica desenvolvida pela National Instruments. Ela é composta por um painel frontal, onde é construída toda a interface do sistema, e um diagrama de blocos onde é desenvolvido o código do programa.

4.2.4 Desenvolvimento da Ferramenta Computacional

O desenvolvimento da ferramenta computacional foi realizado seguindo o diagrama de atividades apresentado pela FIGURA 19. Este diagrama geral foi construído com base nas sequências das atividades executadas para a implementação da ferramenta computacional, sendo dividido em 6 etapas.

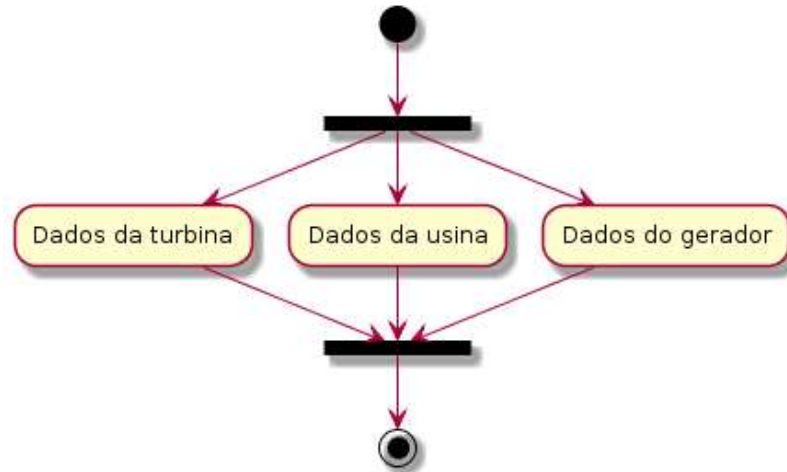
FIGURA 19 - DIAGRAMA GERAL



FONTE: O AUTOR (2019).

A etapa de Parametrização da unidade geradora foi dividida em 3 atividades que podem ser realizadas em paralelo, como pode ser verificado pelo diagrama da FIGURA 20.

FIGURA 20 - DIAGRAMA PARAMETRIZAÇÃO DA UNIDADE GERADORA



FONTE: O AUTOR (2019).

Para cada atividade da FIGURA 20, foram implementadas as entradas dos parâmetros para a configuração da unidade geradora. Na atividade Dados da turbina foram inseridas as entradas para os seguintes parâmetros:

- Altura líquida mínima mais próxima [mca];
- Rendimento máximo para a altura líquida mínima mais próxima [%];
- Vazão para o rendimento máximo [m³/s];
- Coeficiente de pressão para o Winter-Kennedy;
- Potência para o rendimento máximo [kW].

A altura líquida mínima mais próxima é o maior valor inteiro da altura líquida encontrada no diagrama de colina, sendo o valor mais próximo da altura líquida encontrada no ensaio.

Na atividade Dados da usina, foram utilizados os parâmetros referentes a instalações da usina como:

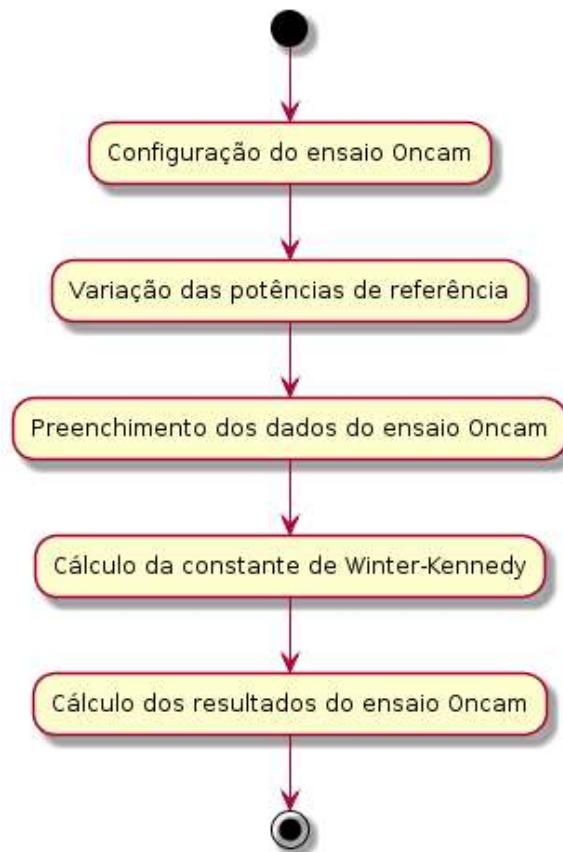
- Nível do transdutor de pressão na entrada [mca];
- Nível do transdutor de pressão na saída [mca];
- Área da seção da entrada [m²];
- Área da seção da saída [m²].

No Dados do gerador, foram inseridas as entradas referentes a curva de rendimento do gerador fornecida pelo fabricante, essas entradas são compostas pelos seguintes vetores:

- Patamar potência do gerador [kW];
- Patamar rendimento gerador [%].

Na segunda etapa apresentada pelo diagrama geral, o Ensaio Oncam, etapa do ensaio com o regulador de velocidade no modo conjugado, foi separado em 5 atividades apresentadas pela FIGURA 21.

FIGURA 21 - DIAGRAMA REALIZAÇÃO DO ENSAIO ONCAM



FONTE: O AUTOR (2019).

Na primeira atividade da FIGURA 21, foram inseridas as seguintes entradas das variáveis para a configuração do ensaio:

- Potência mínima para o ensaio [MW];
- Potência máxima para o ensaio [MW];
- Variação dos patamares de potência [MW].

Na atividade Variação das potências de referência, a partir das variáveis da configuração do ensaio, foi implementada uma lógica para determinar os patamares de potências intermediárias entre a potência mínima e máxima para o ensaio. A variação dos valores destes patamares é definida pelo valor da Variação dos patamares de potência.

Na atividade Preenchimento dos dados do ensaio, foram inseridas as entradas das variáveis da primeira etapa do ensaio sendo estas:

- Nível Montante - Oncam [m];
- Nível Jusante - Oncam [m];
- Abertura do distribuidor - Oncam [%];
- Abertura do rotor - Oncam [%];
- Pressão de entrada em - Oncam [bar];
- Pressão de saída - Oncam [bar];
- Pressão diferencial - Oncam [mbar];
- Potência do gerador - Oncam [kW].

Na quarta atividade, Cálculo da constante de Winter-Kennedy, foi implementada a Equação 5 apresentada no capítulo da Fundamentação Teórica. O valor desta constante é determinado a partir dos Dados da usina e das variáveis de entrada dos ensaios.

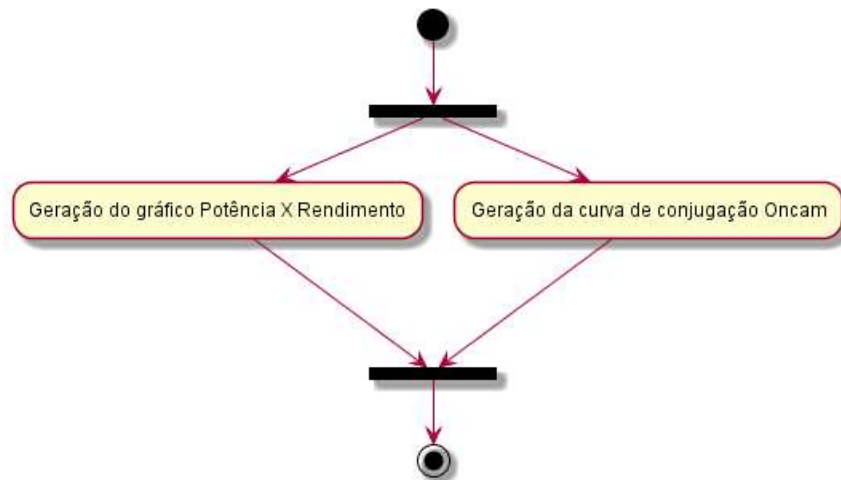
Na última atividade desta etapa, foram implementadas as equações de 1 a 4, apresentadas na Fundamentação Teórica, para determinar os valores das seguintes variáveis:

- Queda bruta - Oncam [m];
- Queda líquida - Oncam [m];
- Rendimento da turbina - Oncam [%];
- Vazão - Oncam [m³/s].

Na terceira etapa do Diagrama Geral, Apresentação do resultado do ensaio Oncam, foram realizadas as atividades para implementar na ferramenta computacional as interfaces para a geração de gráficos a partir dos dados de entrada e valores calculados no ensaio Oncam, sendo um gráfico do rendimento em função da potência e outro da curva de conjugação utilizada pelo regulador de velocidade. O

diagrama da FIGURA 22 mostra que, para essa etapa, as duas atividades são realizadas em paralelo.

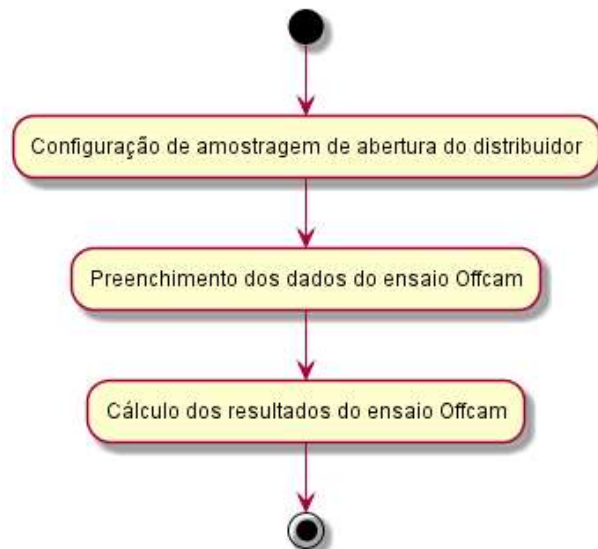
FIGURA 22 - DIAGRAMA DA APRESENTAÇÃO DO ENSAIO OFFCAM



FONTE: O AUTOR (2019).

A quarta etapa do diagrama geral, possui as atividades referentes ao ensaio Offcam, etapa do ensaio com o regulador de velocidade no modo não conjugado, sendo ela dividida em 3 partes como apresentado pela FIGURA 23.

FIGURA 23 - DIAGRAMA ATIVIDADES ENSAIO OFFCAM



FONTE: O AUTOR (2019).

Na atividade Configuração de amostragem de abertura do distribuidor, da FIGURA 24, foi implementada a variável que determina a quantidade de pontos da abertura do distribuidor para cada abertura do rotor.

Na segunda atividade, Preenchimento dos dados do ensaio Offcam, foram implementadas as seguintes entradas das variáveis:

- Nível Montante - Offcam [m];
- Nível Jusante - Offcam [m];
- Abertura do distribuidor - Offcam [%];
- Abertura do rotor - Offcam [%];
- Pressão de entrada em - Offcam [bar];
- Pressão de saída - Offcam [bar];
- Pressão diferencial - Offcam [mbar];
- Potência do gerador - Offcam [kW].

Na atividade Cálculo dos resultados do ensaio Offcam, foram implementadas as equações de 1 a 4, apresentadas na Fundamentação Teórica, para determinar os valores das seguintes variáveis:

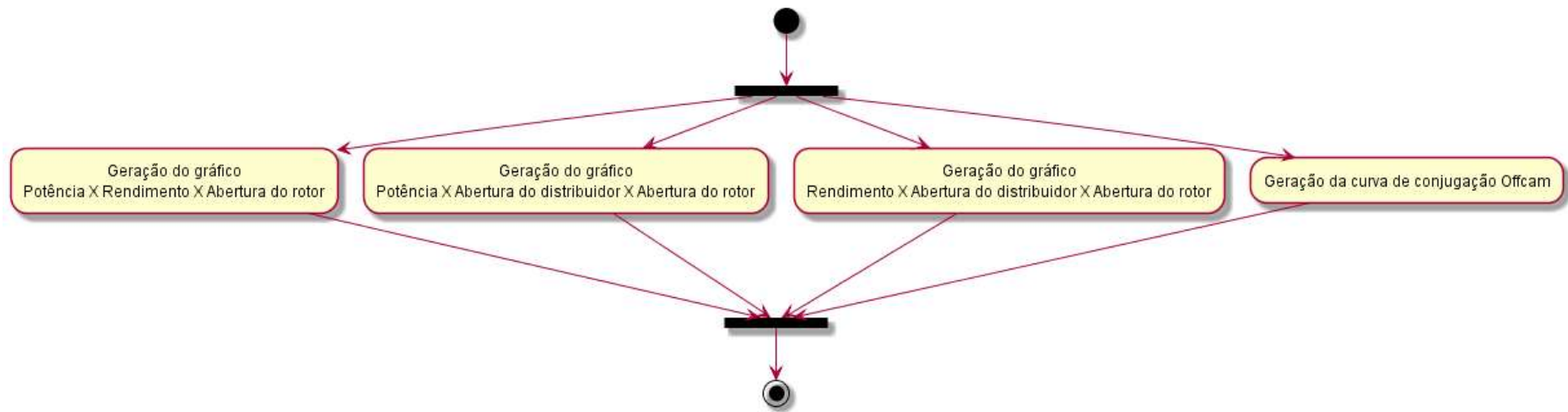
- Queda bruta - Offcam [m];
- Queda líquida - Offcam [m];
- Rendimento da turbina - Offcam [%];
- Vazão - Offcam [m³/s].

Na quinta etapa do diagrama geral, Apresentação do resultado do ensaio Offcam, foram realizadas as atividades para implementar as interfaces para a geração de gráficos a partir dos dados de entrada e valores calculados no ensaio Offcam. A FIGURA 24 mostra o diagrama das atividades dessa etapa, sendo no total 4 atividades para a geração de gráficos:

- Geração do gráfico Potência x Rendimento x Abertura do rotor: Apresenta gráficos do rendimento da turbina em função da potência gerada, para cada abertura do rotor;
- Geração do gráfico Potência x Abertura do distribuidor x Abertura do rotor: Apresenta gráficos da abertura do distribuidor em função da potência gerada, para cada abertura do rotor;
- Geração do gráfico Rendimento x Abertura do distribuidor x Abertura do rotor: Apresenta gráficos do rendimento da turbina em função da abertura do distribuidor, para cada abertura do rotor;

- Geração da curva de conjugação Offcam: Apresenta o gráfico da abertura do rotor em função da abertura do distribuidor com melhor rendimento encontrado no ensaio.

FIGURA 24 - DIAGRAMA DA APRESENTAÇÃO DO ENSAIO OFFCAM



FONTE: O AUTOR (2019).

A última etapa do diagrama geral, se refere a atividade que implementa a otimização dos dados do ensaio Offcam, utilizando o método de regressão polinomial de terceira ordem, conforme apresentado na Fundamentação Teórica. A partir da curva gerada pela regressão polinomial, foi implementado uma lógica que verifica os pontos da curva e indica qual ponto tem melhor rendimento.

4.2.5 Testes da Ferramenta Computacional

Foram realizados testes na ferramenta computacional com dados de ensaios efetuados antes do desenvolvimento do programa. Os resultados dos ensaios foram comparados com aqueles obtidos pela ferramenta computacional para verificar se os valores estavam coerentes e, assim, validar as lógicas e equações implementadas.

4.2.6 Alterações na ferramenta computacional

Nesta etapa foram realizadas alterações na ferramenta computacional, como correções na implementação dos equacionamentos, que durante os testes foram verificados que os resultados não estavam coerentes.

4.2.7 Ensaio de Rendimento

Foram realizados ensaios de rendimento utilizando a ferramenta computacional, inicialmente para testes e ajustes e, na etapa final, para a validação da ferramenta.

4.2.8 Avaliação dos Resultados

Avaliação dos resultados foi realizada verificando o tempo médio para obter os resultados utilizando a ferramenta computacional e comparando com o tempo médio gasto manipulando as planilhas. Além disso, considerando o valor cobrado por hora do serviço, foi calculada a redução do valor cobrado. Outra avaliação realizada, foi comparar o rendimento obtido pela ferramenta computacional com o resultado utilizado pelas planilhas para verificar a redução de consumo de água para uma determinada potência gerada.

5 ESTUDO DE APLICAÇÃO

Para testes e validação da ferramenta computacional, foram utilizados dados de ensaios realizados na Hidrelétrica Santo Antônio, ensaios previstos no projeto P&D intitulado “Desenvolvimento de Técnicas de Deposição de Revestimentos por Aspersão Térmica Robotizada para Redução de Desgaste por Erosão e Cavitação em Turbinas Hidráulicas”;

Os testes iniciais da ferramenta computacional foram realizados com os dados aquisitados no ensaio da unidade geradora 30 e 26, da Usina de Santo Antônio, no período de 01 a 08/02/2019 e 19 a 21/06/2019 respectivamente.

O ensaio de rendimento, para a validação da ferramenta computacional, foi realizado na unidade geradora 13 da Usina Hidrelétrica de Santo Antônio, no período de 22 a 27/07/2019.

5.1 Usina Hidrelétrica de Santo Antônio

A Usina Hidrelétrica Santo Antônio, está localizada no Rio Madeira, no município de Porto Velho, capital de Rondônia. A hidrelétrica tem capacidade de geração de 3.568 MW e garantia física de 2.464 MW, sendo a quarta maior geradora hídrica do Brasil, segundo informações de FURNAS (2019). A usina é dividida em quatro casas de força ou grupos geradores (GG). A casa de força 1 (GG1) possui 8 turbinas, a casa de força 2 e 3 (GG2 e GG3) possuem 12 turbinas cada, e a casa de força 4 (GG4) possui 18 turbinas. A FIGURA 25 apresenta a localização das casas de força.

FIGURA 25 - USINA HIDRELÉTRICA SANTO ANTÔNIO



FONTE: SAE (2016).

A Hidrelétrica Santo Antônio é composta por 50 unidades geradoras, com turbinas do tipo Bulbo, sendo estas turbinas de 4 e 5 pás, com as características apresentadas pela FIGURA 26 e FIGURA 27 respectivamente.

FIGURA 26 - DADOS TÉCNICOS DA TURBINA DE 4 PÁS

DADOS TURBINA BULBO 4 PÁS			
Queda nominal:	13,9 m	Queda máxima:	20,69 m
Vazão nominal:	605,61 m ³ /s	Elevação da linha de centro do distribuidor:	33,35 m
Potência nominal:	74800 kW	Potência máxima:	75550 kW
Rotação nominal:	100 rpm	Rotação de disparo garantida:	300 rpm
		Sentido de rotação:	Horário - visto do gerador

FONTE: VOITH (2016).

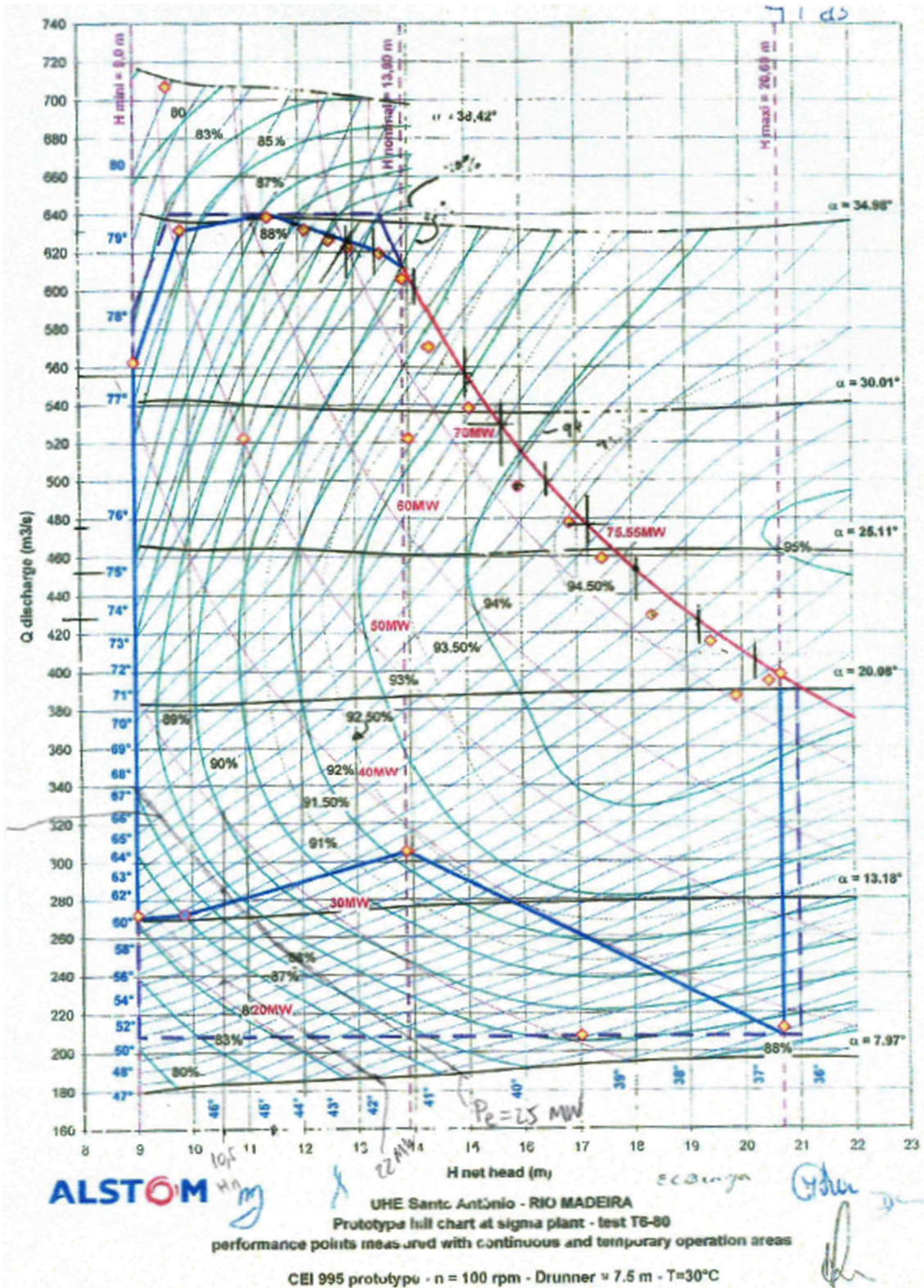
FIGURA 27 - DADOS TÉCNICOS DA TURBINA DE 5 PÁS

DADOS TURBINA BULBO 5 PÁS			
Queda nominal:	13,90 m	Queda máxima:	25,15 m
Vazão nominal:	582,8 m ³ /s	Elevação da linha de centro do distribuidor:	33,35 m
Potência nominal:	71050 kW	Potência máxima:	75550 kW
Rotação nominal:	100 rpm	Rotação de disparo garantida:	300 rpm
		Sentido de rotação:	Horário - visto do gerador

FONTE: VOITH (2016).

As informações da faixa de operação da turbina, assim como a vazão e o rendimento em função da queda líquida e da potência são obtidas a partir do diagrama de colina fornecida pelo fabricante da turbina. A FIGURA 28 apresenta o diagrama de colina para a turbina de 4 pás.

FIGURA 28 - DIAGRAMA DE COLINA DA TURBINA DE 4 PÁS

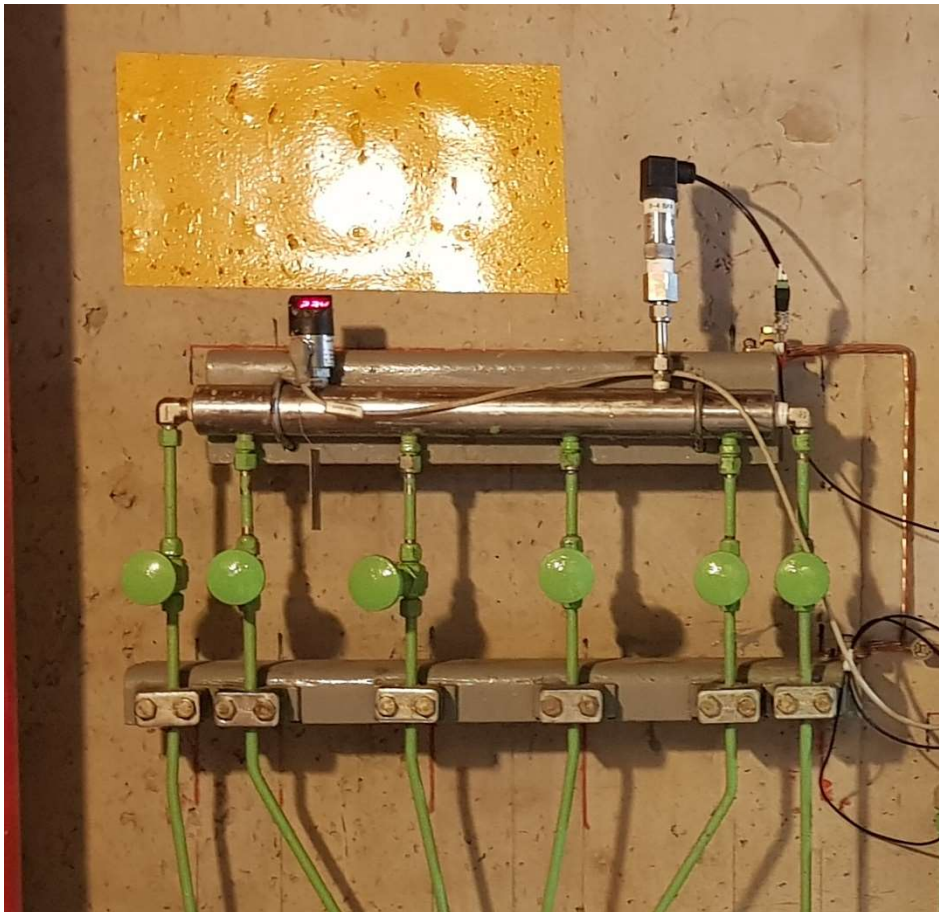


FONTE: ALSTON (2007).

5.2 Ensaios de Rendimento

Os ensaios de rendimento foram realizados na unidade geradora 13, que utiliza uma turbina hidráulica de 4 pás. A unidade geradora para o ensaio foi definida pela usina e pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), de acordo com a disponibilidade de operação das unidades geradoras da usina. Para os ensaios, foram instalados transdutores de pressão nas tomadas de entrada (adução) e nas tomadas de saída (sucção) da turbina como apresentado na FIGURA 29 e FIGURA 30 respectivamente. Os valores destas variáveis são utilizados para obter o valor da queda líquida.

FIGURA 29 - MEDIÇÃO DA PRESSÃO NA ENTRADA DA TURBINA



FONTE: O AUTOR (2019).

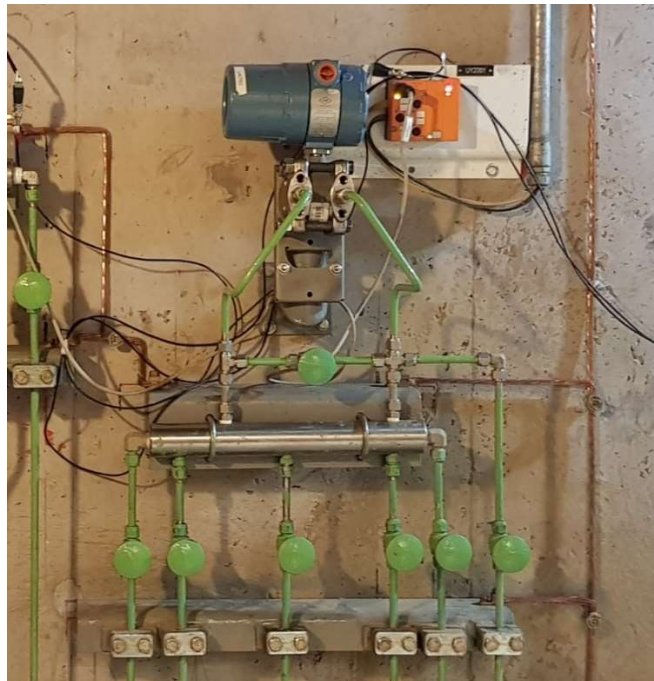
FIGURA 30 - MEDIÇÃO DA PRESSÃO NA SAÍDA DA TURBINA



FONTE: O AUTOR (2019).

Para determinar a vazão pelo método de Winter-Kennedy, foi instalado um transdutor de pressão diferencial como mostrado na FIGURA 31.

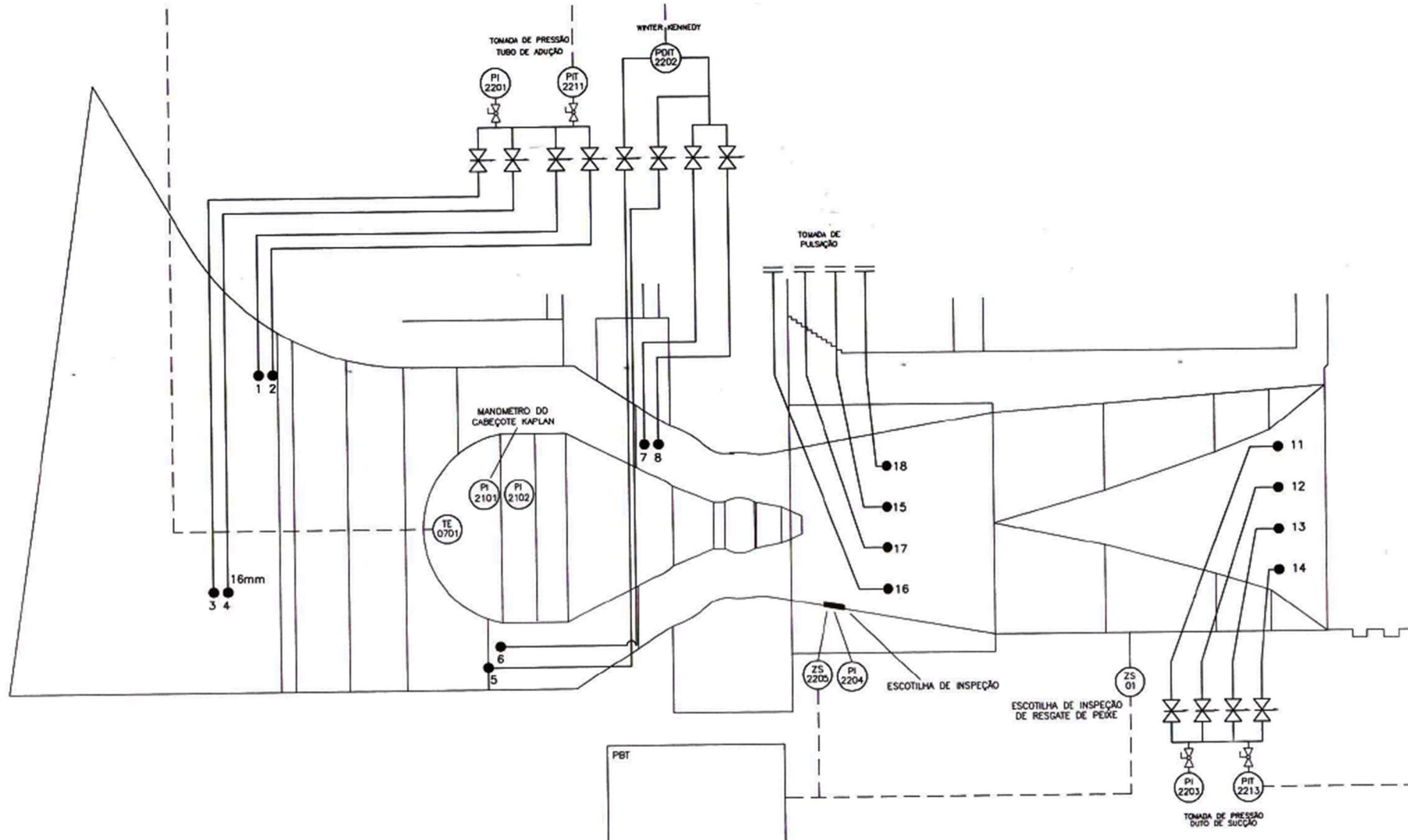
FIGURA 31 - MEDIÇÃO DA PRESSÃO DIFERENCIAL NA TURBINA



FONTE: O AUTOR (2019).

A FIGURA 32, mostra a localização das tomadas de pressão. A tomada de pressão na adução é dada pelos pontos 1 a 4, enquanto a de sucção pelos pontos 11 a 14. Para o Winter-Kennedy, a diferença de pressão é dada entre tomada 5 e as tomadas 6, 7 e 8.

FIGURA 32 - LOCALIZAÇÃO DAS TOMADAS DE PRESSÃO



FONTE: ALSTON (2007).

Os dados de abertura do distribuidor, abertura das pás do rotor, potência gerada, nível montante e jusante foram adquiridos diretamente do próprio sistema da usina devido à dificuldade para a instalação de instrumentos medição destas variáveis.

No período que foi realizado o ensaio, entre 22 a 27 de julho de 2019, a queda líquida para a unidade geradora 13 estava em aproximadamente 21 metros. Para essa queda líquida, de acordo com o diagrama colina fornecido pelo fabricante, a turbina pode operar entre 38 a 75,5 MW. Neste ensaio, foram definidos 6 patamares para avaliação do rendimento entre os valores de 38 a 74 MW.

Na primeira etapa foi realizado o ensaio com a unidade geradora no modo conjugado, para o levantamento da curva de conjugação utilizada pelo regulador de velocidade e a curva de rendimento. Os dados adquiridos pelos sistemas da usina e pelo sistema da National Instruments, nesta etapa do ensaio, foram inseridos manualmente na ferramenta computacional durante o ensaio e os resultados foram gerados durante esse processo. A FIGURA 33 apresenta a interface da ferramenta computacional com os dados de entrada, na tabela à esquerda, e os resultados das variáveis calculadas na tabela à direita.

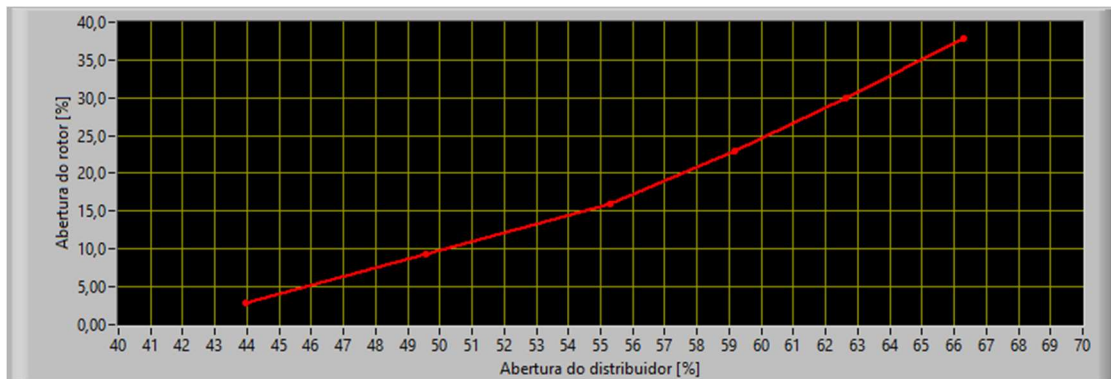
FIGURA 33 - DADOS E RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA DO ENSAIO UTILIZANDO A FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Dados de entrada									Dados de saída				
	Nível Montante [m]	Nível Jusante [m]	Abertura Distribuidor [%]	Abertura Rotor [%]	Pressão de entrada [bar]	Pressão de saída [bar]	Pressão diferencial [mbar]	Potência gerador [kW]		Queda Bruta [m]	Queda líquida [m]	Rendimento [%]	Vazão [m³/s]
38MW	70,47	49,02	43,94	2,91	2,287	0,229	7,73	38450	38MW	21,450000	21,330089	89,277506	210,794577
45MW	70,47	49,02	49,56	9,41	2,286	0,229	10,48	45215	45MW	21,450000	21,316753	90,186585	245,442818
52MW	70,47	49,02	55,31	15,90	2,285	0,229	13,83	52750	52MW	21,450000	21,302750	91,618605	281,955634
59MW	70,47	49,02	59,17	22,91	2,283	0,225	17,25	59488	59MW	21,450000	21,319498	92,408870	314,893892
66MW	70,47	49,02	62,61	29,93	2,280	0,229	21,28	66315	66MW	21,450000	21,243081	93,081695	349,748209
74MW	70,47	49,02	66,28	37,88	2,278	0,231	26,46	74370	74MW	21,450000	21,196213	93,821076	390,000000

FONTE: ALSTON (2007).

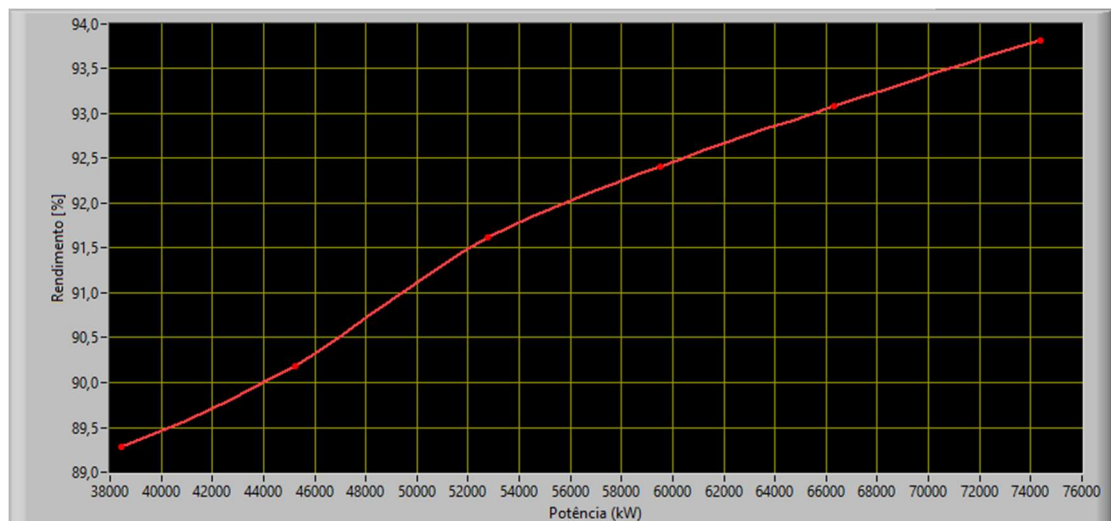
Nessa primeira etapa do ensaio, é obtida somente a curva de conjugação utilizada no regulador de velocidade e a curva de rendimento em função da potência gerada, para verificar o comportamento do equipamento. A FIGURA 34 e FIGURA 35, apresentam a curva de conjugação e rendimento obtidos pela ferramenta computacional.

FIGURA 34 - CURVA DE CONJUGAÇÃO UTILIZADA PELO REGULADOR DE VELOCIDADE OBTIDA PELA FERRAMENTA COMPUTACIONAL



FONTE: O AUTOR (2019).

FIGURA 35 - CURVA DE RENDIMENTO OBTIDO PELA FERRAMENTA COMPUTACIONAL



FONTE: O AUTOR (2019).

A segunda etapa, ensaio que é realizado no modo não conjugado, foi realizada fixando-se a abertura das pás do rotor encontrada em cada patamar de potência na primeira etapa e, para cada valor desta variável, variou-se a abertura do distribuidor coletando os dados necessários para os cálculos dos rendimentos. A FIGURA 36 apresenta os dados de entrada, na tabela à esquerda, e os resultados das variáveis calculadas na tabela à direita para a segunda etapa. Devido a elevada quantidade de dados, somente parte deles está sendo apresentada nesta imagem.

FIGURA 36 - DADOS E RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA DO ENSAIO UTILIZANDO A FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Dados de entrada - Offcam									Dados de saída - Offcam				
	Nível Montante [m]	Nível Jusante [m]	Abertura Distribuidor [%]	Abertura Rotor [%]	Pressão de entrada [bar]	Pressão de saída [bar]	Pressão diferencial [mbar]	Potência gerador [kW]		Queda Bruta [m]	Queda líquida [m]	Rendimento [%]	Vazão [m³/s]
2,91	70,47	49,01	40,00	2,91	2,287	0,229	7,08	35135	2,91	21,460000	21,330812	85,271928	201,737352
2,91	70,47	49,01	41,99	2,91	2,288	0,229	7,51	37206	2,91	21,460000	21,340610	87,613697	207,773261
2,91	70,47	49,01	44,00	2,91	2,287	0,229	7,69	37961	2,91	21,460000	21,330133	88,375463	210,248476
2,91	70,47	49,01	46,00	2,91	2,287	0,228	8,26	40077	2,91	21,460000	21,339776	89,963841	217,901245
2,91	70,47	49,01	48,01	2,91	2,286	0,227	8,75	40729	2,91	21,460000	21,339231	88,830475	224,271307
2,91	70,47	49,01	50,00	2,91	2,286	0,227	8,85	41903	2,91	21,460000	21,339119	90,869274	225,549216
2,91	70,47	49,01	52,00	2,91	2,287	0,228	9,22	42601	2,91	21,460000	21,338708	90,509430	230,215811
9,41	70,46	49,06	45,70	9,41	2,285	0,230	9,49	42261	9,41	21,400000	21,297302	88,673888	233,562327
9,41	70,46	49,06	47,69	9,41	2,285	0,230	9,95	44448	9,41	21,400000	21,296790	91,075419	239,155971
9,41	70,46	49,06	49,68	9,41	2,284	0,231	10,31	45453	9,41	21,400000	21,275837	91,580625	243,443969
9,41	70,46	49,06	51,69	9,41	2,285	0,227	10,93	47008	9,41	21,400000	21,326529	91,763923	250,656960
9,41	70,46	49,06	53,69	9,41	2,285	0,228	11,52	48097	9,41	21,400000	21,315596	91,496842	257,333263
9,41	70,46	49,06	53,69	9,41	2,285	0,228	11,52	48097	9,41	21,400000	21,315596	91,496842	257,333263
9,41	70,46	49,06	53,69	9,41	2,285	0,228	11,52	48097	9,41	21,400000	21,315596	91,496842	257,333263
15,90	70,46	49,04	51,24	15,90	2,285	0,225	12,2	48927	15,90	21,420000	21,345669	90,314308	264,819281
15,90	70,46	49,04	53,24	15,90	2,285	0,228	13,06	51110	15,90	21,420000	21,313883	91,311032	273,994141
15,90	70,46	49,04	55,24	15,90	2,284	0,228	13,35	52900	15,90	21,420000	21,303284	93,513104	277,019487
15,90	70,46	49,04	55,65	15,90	2,282	0,228	13,2	52936	15,90	21,420000	21,282898	94,196859	275,458801
15,90	70,46	49,04	57,24	15,90	2,283	0,228	13,99	53689	15,90	21,420000	21,292296	92,754930	283,581924
15,90	70,46	49,04	57,24	15,90	2,283	0,228	13,99	53689	15,90	21,420000	21,292296	92,754930	283,581924
15,90	70,46	49,04	57,24	15,90	2,283	0,228	13,99	53689	15,90	21,420000	21,292296	92,754930	283,581924
22,91	70,45	49,05	55,31	22,91	2,282	0,231	15,57	55601	22,91	21,400000	21,249433	91,226963	299,167211
22,91	70,45	49,05	57,31	22,91	2,281	0,232	16,20	57920	22,91	21,400000	21,228179	93,245737	305,159711
22,91	70,45	49,05	59,31	22,91	2,279	0,230	17,15	59610	22,91	21,400000	21,227123	93,272100	313,979830

FONTE: O AUTOR (2019).

A partir dos dados da segunda etapa do ensaio, o módulo de otimização da ferramenta sugeriu possíveis aberturas com maiores rendimentos, indicadas pela FIGURA 37.

FIGURA 37 - VALORES DE ABERTURA SUGERIDOS COM MELHOR RENDIMENTO

Dados otimizados		
	Abertura distribuidor sugerida [%]	Rendimento para abertura sugerida [%]
2,91	51,000011	90,713146
9,41	50,342198	91,791680
15,9	57,511839	93,251931
22,91	60,354585	93,730698
29,93	64,796007	94,279961
37,88	65,774742	94,211328

FONTE: O AUTOR (2019).

Para a verificação dos valores indicados pelo módulo de otimização, durante o ensaio foram avaliadas somente 4 aberturas sugeridas pelo sistema. Devido ao tempo limitado pela usina para a realização dos ensaios, não foi possível verificar os pontos com melhores rendimentos sugeridos pela ferramenta computacional, para as aberturas das pás do rotor de 2,91 e 4,91%.

Durante o ensaio, foram ajustadas no regulador de velocidade as aberturas do distribuidor conforme a TABELA 1, porém, devido à característica do sistema de controle do regulador de velocidade, as aberturas do distribuidor reais tiveram uma pequena diferença em relação aos valores solicitados. Para cada posição da abertura do distribuidor, os dados adquiridos foram inseridos na ferramenta computacional para obter o rendimento. Na TABELA 1, são apresentados os valores desta verificação.

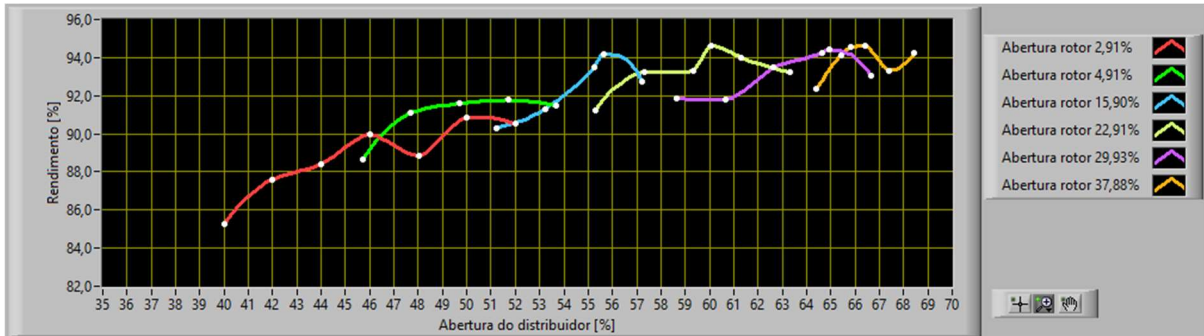
TABELA 1 - RENDIMENTOS CALCULADOS PARA ABERTURAS SUGERIDAS

FONTE: O AUTOR (2019).

Abertura do distribuidor solicitada [%]	Abertura real do distribuidor [%]	Abertura das pás do rotor [%]	Potência gerada [kW]	Rendimento [%]
57,51	55,65	15,90	52946	94,21
60,35	60,07	22,91	60500	94,58
64,80	64,94	29,93	67402	94,31
65,77	65,84	37,88	74219	94,22

A curva de rendimento em função da abertura do distribuidor, fornecida pela ferramenta computacional considerando também os dados da TABELA 1, é apresentada pela FIGURA 38.

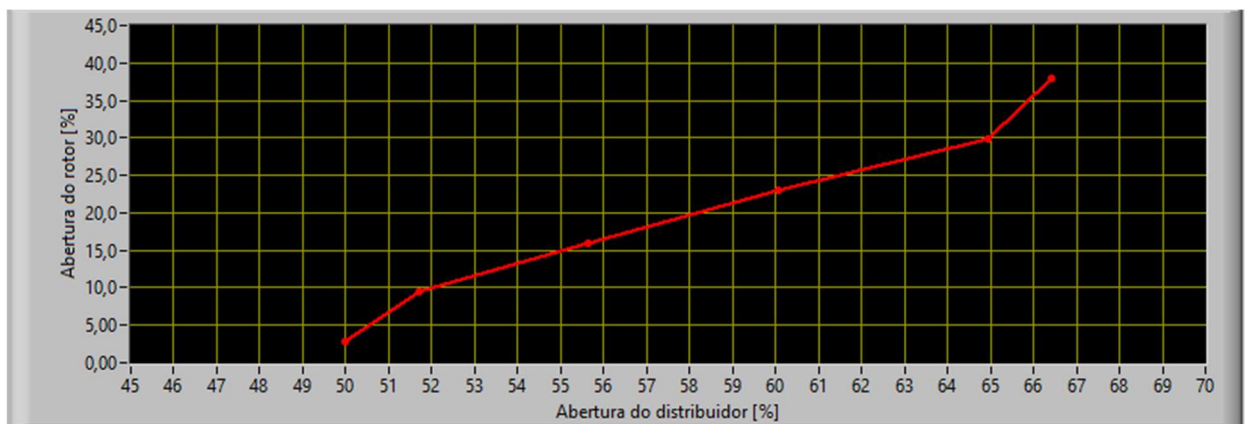
FIGURA 38 - CURVA DE RENDIMENTO EM FUNÇÃO DA ABERTURA DO DISTRIBUIDOR OBTIDA PELA FERRAMENTA COMPUTACIONAL



FONTE: O AUTOR (2019).

A partir das curvas da FIGURA 38, a ferramenta computacional gera uma nova curva de conjugação para estes dados otimizados, FIGURA 39.

FIGURA 39 - CURVA DE CONJUGAÇÃO PARA OS DADOS OTIMIZADOS



FONTE: O AUTOR (2019).

Para comparar os resultados do rendimento utilizando as planilhas e a ferramenta computacional, os dados da segunda etapa foram inseridos na planilha principal. No APÊNDICE II, são apresentados os resultados obtidos utilizando a planilha principal, para cada posição das pás do rotor. Os rendimentos obtidos pelos resultados do APÊNDICE II, assim como os dados das aberturas das pás do rotor, abertura do distribuidor e potência gerada, são utilizados na planilha apresentada pela FIGURA 40, para verificar as aberturas do distribuidor com as quais se obteve maior rendimento nos ensaios. Nesta planilha, os valores identificados na cor vermelha

representam a abertura do distribuidor e potência com maiores valores de rendimento para uma determinada abertura das pás do rotor.

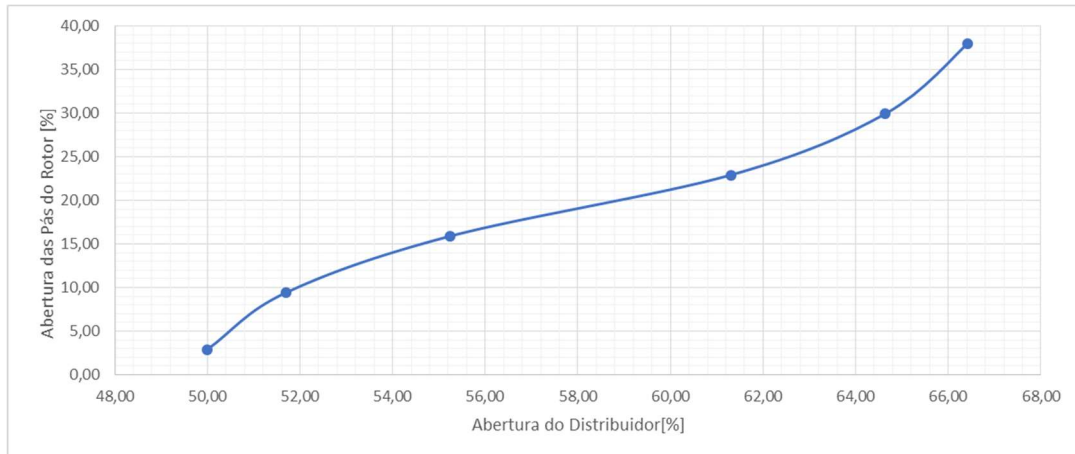
FIGURA 40 - PLANILHA PARA VERIFICAR AS ABERTURAS DE MAIORES RENDIMENTOS DA UG13

Abertura das Pás do Rotor [%]	Abertura do Distribuidor [%]	Potência do Gerador [kW]	Rendimento da Turbina [%]	Maior Rendimento da Turbina [%]	Abertura do Distribuidor para o maior rendimento [%]
2,91	40,00	35135	85,540	91,211	50,00
	41,99	37206	87,910		
	44,00	37961	88,681		
	46,00	40077	90,296		
	48,02	40729	89,161		
	50,00	41903	91,211		
	52,00	42601	90,853		
9,41	45,70	42261	88,918	92,034	51,69
	47,69	44448	91,334		
	49,68	45453	91,844		
	51,69	47008	92,034		
	53,69	48097	91,770		
15,90	51,24	48927	90,311	93,529	55,24
	53,24	51110	91,317		
	55,24	52900	93,529		
	57,24	53689	92,776		
22,91	55,31	55601	91,165	93,947	61,30
	57,31	57920	93,195		
	59,31	59610	93,225		
	61,30	60900	93,947		
	63,33	61509	93,160		
29,93	58,66	62229	91,772	94,153	64,64
	60,65	63619	91,688		
	62,64	66135	93,375		
	64,64	67455	94,153		
	66,66	67631	92,962		
37,94	64,42	71452	92,059	94,316	66,41
	65,42	73800	93,804		
	66,41	74696	94,316		
	67,41	74960	93,036		
	68,44	75294	93,969		

FONTE: O AUTOR (2019).

Com os resultados da planilha da FIGURA 40, é gerada a curva de conjugação com o melhor rendimento como pode ser observado na FIGURA 41.

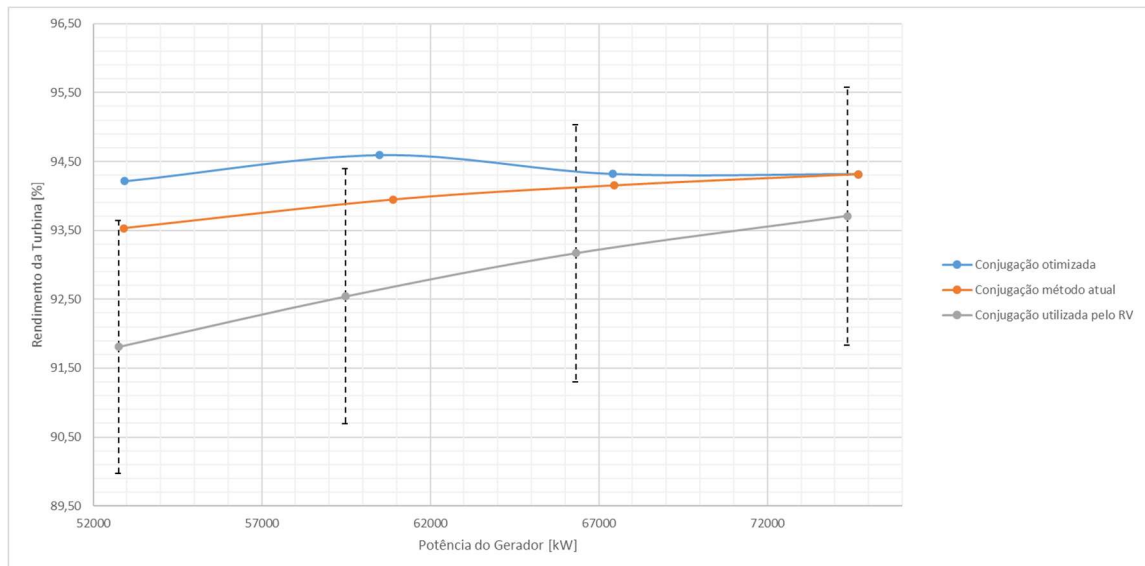
FIGURA 41 - CURVA DE CONJUGAÇÃO LEVANTADA COM MAIOR RENDIMENTO



FONTE: O AUTOR (2019).

Na FIGURA 42, são comparadas as curvas de rendimento em função da potência para a curva de conjugação utilizada no regulador de velocidade (RV), obtida na primeira etapa do ensaio, para a curva de conjugação obtida utilizando as planilhas e para a curva de conjugação obtida pela ferramenta computacional, estas duas últimas obtidas na segunda etapa.

FIGURA 42 - RENDIMENTO EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA PARA AS CURVAS DE CONJUGAÇÃO OBTIDAS NOS ENSAIOS



FONTE: O AUTOR (2019).

O critério utilizado para verificar se há necessidade de alteração na curva de conjugação instalada no regulado de velocidade, é se o rendimento da segunda etapa do ensaio é maior que a faixa de incerteza encontrada na primeira etapa. Analisando

as curvas da FIGURA 42, verifica-se que em alguns pontos o rendimento com a curva de conjugação obtida pela ferramenta computacional fica a cima da faixa de incerteza de medição. No caso do rendimento utilizando a curva de conjugação obtida pela planilha, nenhum ponto ficou acima da faixa de incerteza. Portanto, para esse caso, utilizando a ferramenta computacional é possível garantir um ganho no rendimento alterando os pontos da curva de conjugação que estão acima da faixa de incerteza de medição.

Para a potência de 53 MW, a partir da FIGURA 42, os dados otimizados apresentaram um rendimento de aproximadamente 0,56% maior que o rendimento da curva de conjugação instalada, considerando a incerteza de medição. Porém, à medida que a potência aumenta essa diferença se reduz.

A incerteza de medição calculada para o rendimento é de aproximadamente 2%, as equações e dados utilizados nos cálculos das incertezas são apresentadas no APÊNDICE III.

Os modelos utilizados para encontrar o melhor rendimento, foram obtidos através do método de regressão polinomial com os dados da abertura do distribuidor e do rendimento, para as aberturas do rotor de 15,9%, 22,91%, 29,93% e 37,94%, apresentadas no APÊNDICE II. Foram testados regressão polinomial de 2º, 3º e 4º grau, e os melhores resultados apresentados foram obtidos utilizando polinômios de terceiro grau. A TABELA 2 apresenta os modelos de 3º grau obtidos para cada abertura do rotor:

TABELA 2 - MODELOS OBTIDOS UTILIZANDO REGRESSÃO POLINOMIAL

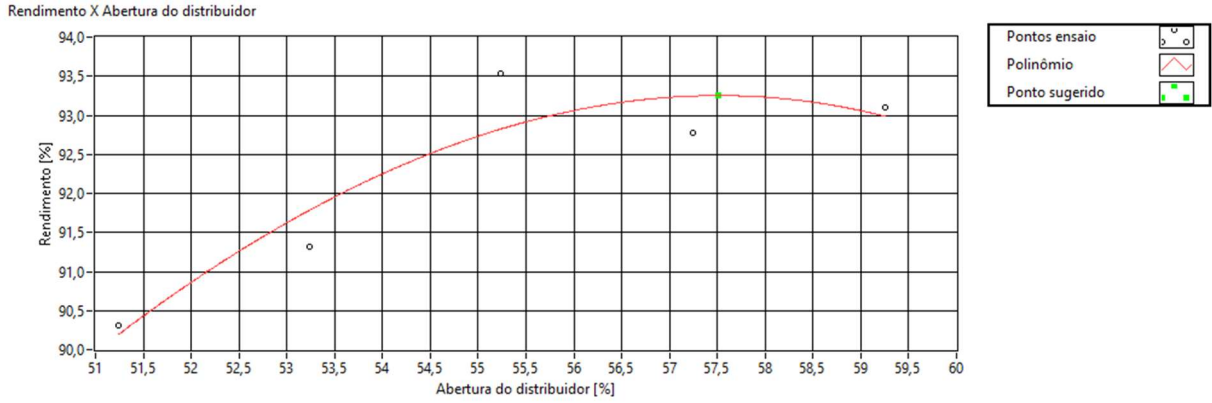
FONTE: AUTOR (2019).

Abertura do rotor	Modelo
15,90%	$-1,23 \cdot 10^5 \cdot x^3 + 1,26 \cdot 10^3 \cdot x^2 - 0,02 \cdot x + 0,44$
22,91%	$5,15 \cdot 10^5 \cdot x^3 - 0,01 \cdot x^2 + 0,65 \cdot x - 13,02$
29,93%	$-3,92 \cdot 10^4 \cdot x^3 + 7,32 \cdot 10^2 \cdot x^2 - 4,55 \cdot x + 94,83$
37,94%	$2,96 \cdot 10^3 \cdot x^3 - 0,59 \cdot x^2 + 39,51 \cdot x - 876,99$

Os resultados dos modelos para as aberturas de 15,90%, 22,91%, 29,93% e 37,94% são apresentados pela FIGURA 43, FIGURA 44, FIGURA 45 e FIGURA 46 respectivamente. Nessas figuras são apresentados os pontos obtidos do ensaio, a

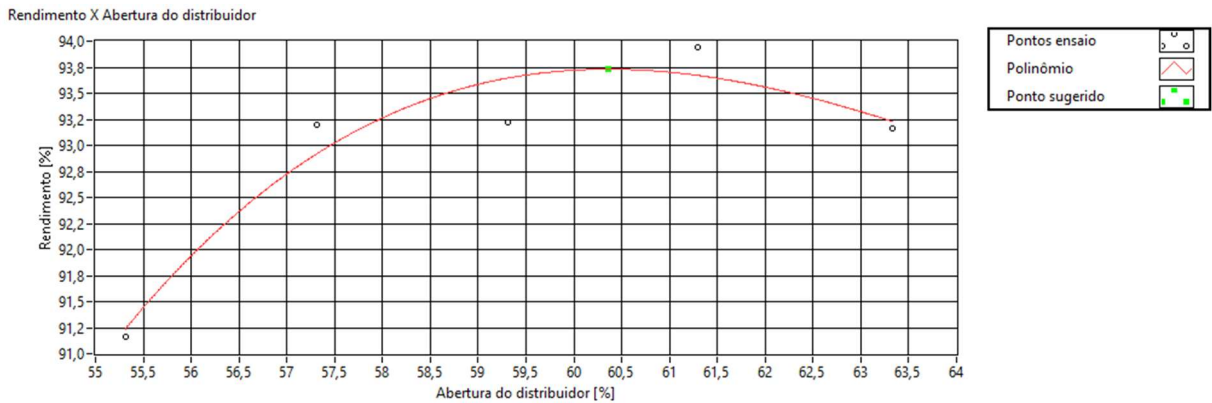
curva obtida usando o polinômio de 3º grau, em vermelho, e o ponto máximo desta curva, na cor verde.

FIGURA 43 - RESULTADO DO MODELO PARA 15,90%



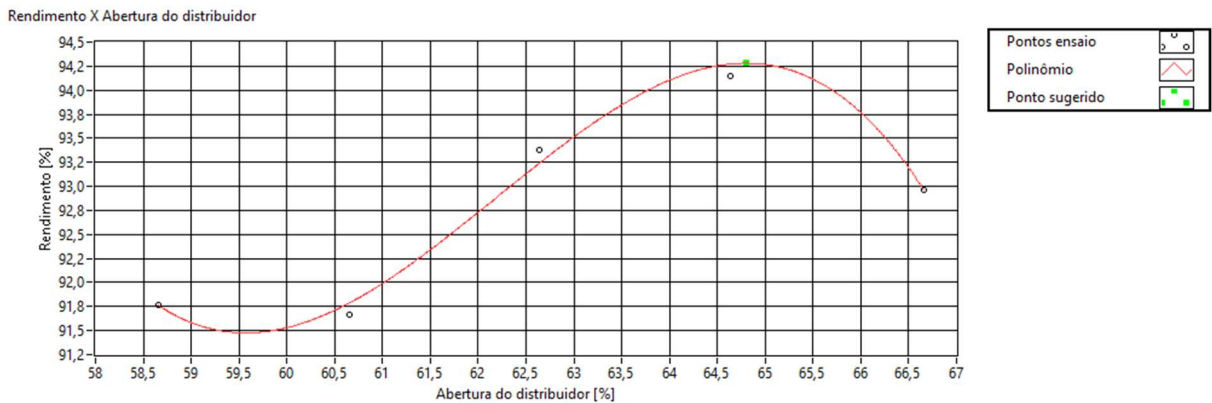
FONTE: O AUTOR (2019).

FIGURA 44 - RESULTADO DO MODELO PARA 22,91%



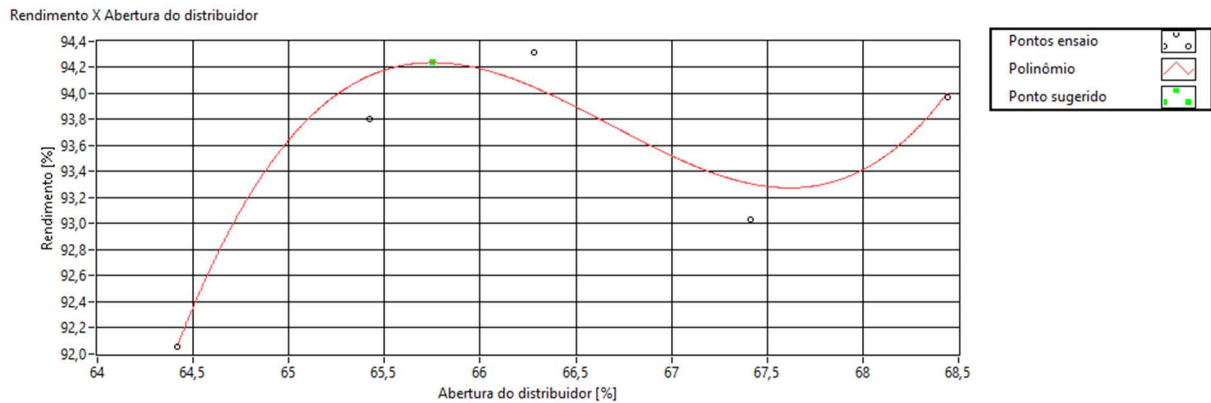
FONTE: O AUTOR (2019).

FIGURA 45 - RESULTADO DO MODELO PARA 29,93%



FONTE: O AUTOR (2019).

FIGURA 46 - RESULTADO DO MODELO PARA 37,94%



FONTES: O AUTOR (2019).

Os modelos de 2º e 4º grau obtidos pela regressão polinomial, e os resultados destes modelos são apresentados no APÊNDICE IV.

Em relação ao tempo total gasto utilizando a ferramenta computacional, considerando o tempo para a parametrização antes do ensaio e o tempo utilizado após o ensaio, foi de 3 horas. Já no caso das planilhas, o tempo total considerando a manipulação antes e após o ensaio, foi de 10 horas. Sendo assim, a redução de tempo utilizado nesse processo seria de 7 horas.

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

A ferramenta computacional foi utilizada durante o ensaio de rendimento, para a realização de testes e validação, e os resultados foram comparados com os da planilha. Na primeira etapa, cujo objetivo é levantar a curva de conjugação utilizada no regulador de velocidade e o rendimento da turbina, os resultados dos dois métodos deveriam ser iguais. Esse fato foi comprovado no decorrer deste trabalho o que demonstra que a ferramenta computacional não apresenta incoerência nos resultados calculados em relação aos valores obtidos pelas planilhas.

Na segunda etapa, dos 4 pontos sugeridos pela ferramenta computacional e que foram verificados, 2 possuem um rendimento maior que os pontos obtidos pelas planilhas, e acima da faixa de incerteza de medição, podendo-se assim sugerir alteração desses pontos no regulador de velocidade para otimizar a unidade geradora nessa faixa de operação. O ponto com melhor resultado teve um rendimento de 0,56% maior que o valor do rendimento da curva de conjugação utilizada no regulador de velocidade, considerando a incerteza de medição.

Utilizando a planilha é possível obter os mesmos resultados da ferramenta computacional, mas para isso, é necessário aumentar a quantidade de pontos de aquisição da variação do distribuidor para cada abertura das pás do rotor. Isso implica no aumento de tempo do ensaio, já que para a coleta de cada ponto é necessário aguardar a estabilização da unidade geradora, devido ao transitório do sistema que ocorre na alteração da vazão. Porém, com o tempo limitado para o ensaio, por motivos operacionais, não é possível coletar mais pontos.

Com a ferramenta computacional, é possível diminuir o tempo para obter os resultados do ensaio, e não precisar mais da consultoria para o processamento e análise dos dados, já que não há mais necessidade de manipulação das planilhas e a ferramenta já gera os resultados para o relatório, reduzindo-se assim o custo do serviço e, também, mantendo esse conhecimento do consultor aplicado em uma ferramenta. Além de reduzir o custo do serviço, aumentando a competitividade no mercado, com a redução do tempo para executar uma determinada atividade obtém-se a maior disponibilidade do funcionário para executar outros trabalhos.

A ferramenta computacional apresenta algumas limitações, dentre elas:

- Cálculo e análise das incertezas de medições dos valores obtidos, sendo isso realizado separadamente após o ensaio;
- Análise das vibrações nos mancais, para verificar se as condições operacionais estão de acordo com a norma;

Essas limitações não influenciam nos resultados da ferramenta computacional, porque estas análises também não são realizadas pelas planilhas, são realizadas separadamente após os ensaios.

A realização desse trabalho permitiu levantar oportunidades de realização de trabalhos que permitam sua continuidade à título de trabalhos futuros, dentre eles:

- Desenvolvimento de ferramenta computacional para integração com o sistema do regulador de velocidade e outros sistemas da usina para monitoramento do rendimento durante a operação da unidade geradora;
- Desenvolvimento da ferramenta computacional para ensaios de rendimento com métodos para obter valores absolutos da vazão;
- Desenvolvimento de módulos da ferramenta computacional para geração de relatórios;

REFERÊNCIAS

- ABBAS, A.; KUMAR, A. Evaluation of uncertainty in flow and performance parameters in Francis turbine test rig. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 65, p. 297–308, 2019. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955598617302960>>. .
- ALSTON. Fluxograma dos Sistemas Auxiliares Gerador/Turbina - Sistema de Medições Hidráulicas. , 2007.
- AMOS GILAT. **Métodos Numéricos Para Engenheiros e Cientistas. Uma Introdução com Aplicações Usando o MATLAB**. 2008.
- ANEEL. Capacidade de Geração do Brasil. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 18/3/2019.
- ATTA, K. T.; JOHANSSON, A.; CERVANTES, M. J.; GUSTAFSSON, T. Phasor extremum seeking and its application in Kaplan turbine control. 2014 IEEE Conference on Control Applications (CCA). **Anais...** . p.298–303, 2014.
- BASURTO-PENSADO, M.; URQUIZA, G.; CASTRO, L.; ADAMKOWSKI, A.; JANICKI, W. Flow Measurement Methods Applied to Hydro Power Plants. . p.151–198, 2012.
- BOŽIĆ, I.; BENIŠEK, M. An improved formula for determination of secondary energy losses in the runner of Kaplan turbine. **Renewable Energy**, v. 94, p. 537–546, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116302762>>. .
- DUNCA, G.; BUCUR, D. M.; CERVANTES, M. J.; POPA, R. Discharge evaluation from pressure measurements by a genetic algorithm based method. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 45, p. 49–55, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955598615000357>>. .
- FURNAS. Usina de Santo Antônio. Disponível em: <<https://www.furnas.com.br/subsecao/134/usina-de-santo-antonio---3568-mw>>. Acesso em: 27/11/2019.
- IEC 60041, I. Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines. **International Standard**, p. 419, 1991.
- IEC 62006, I. HYDRAULIC MACHINES – ACCEPTANCE TESTS OF SMALL HYDROELECTRIC INSTALLATIONS FOREWORD. **International Standard**, p. 223, 2010.
- LANZERSDORFER, J.; HACKL, B. A practical approach to use the thermodynamic efficiency method for flow measurements. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 63, p. 33–36, 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955598618302309>>. .

LIU, X.; LUO, Y.; KARNEY, B. W.; WANG, W. A selected literature review of efficiency improvements in hydraulic turbines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 18–28, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115005936>>. .

MACINTYRE, A. J. **Máquinas Motrizes Hidráulicas**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983.

MENARIN, H. A.; COSTA, H. A.; FREDO, G. L. M.; et al. Dynamic modelling of Kaplan turbines including flow rate and efficiency static characteristics. **IEEE Transactions on Power Systems**, p. 1, 2019.

SAE, S. A. E. Hidrelétrica Santo Antônio opera com 43 turbinas. Disponível em: <<https://www.santoantonioenergia.com.br/hidreletrica-santo-antonio-opera-com-43-turbinas/>>. Acesso em: 20/8/2019.

VIANA, A. N. C. **Bombas Funcionando como Turbinas**. Rio de Janeiro: Synergia, 2012.

VOITH. Placa de Identificação da Turbina de 4 e 5 pás. , 2016.

APÊNDICE I - ENSAIO DE RENDIMENTO

Para realizar o ensaio de rendimento, inicialmente são instaladas as instrumentações que irão medir as pressões nas tomadas da adução, sucção e pressão diferencial de Winter-Kennedy. Em alguns casos, também é instalada um Wattímetro, para adquirir os valores da potência elétrica gerada, acelerômetros e proxímetros, para medir a vibração e oscilação no eixo respectivamente. O tempo para a instalação das instrumentações, em uma unidade geradora, leva em média de 4 a 6 horas, dependendo da quantidade de instrumentos que serão instalados.

Finalizada a instalação das instrumentações, são realizadas as verificações e configurações dos sistemas de aquisição de dados e parametrização das planilhas para o ensaio com os dados da usina, levando em média de 2 a 4 horas para estas atividades.

Para o caso das turbinas Kaplan, o ensaio é realizado em duas etapas. Na primeira etapa, é realizada uma tomada de carga na unidade geradora utilizando o modo de operação conjugado no regulador de velocidade. Inicia-se o ensaio com a menor potência gerada, para a queda líquida disponível no dia ensaio, e aumenta-se a carga até a máxima potência. A tomada de carga é realizada em patamares, no mínimo 6, e em cada patamar são coletados os dados do ensaio. A cada variação da potência (alteração do patamar), é necessário aguardar a estabilização da potência antes de coletar os dados. O tempo para a estabilização varia entre 10 a 15 min, e o tempo total desta etapa do ensaio varia de 1 a 2 horas, dependendo da quantidade de patamares e do tempo de estabilização.

A segunda etapa do ensaio, é realizada no modo não conjugado, onde para cada posição das pás do rotor, encontrada em cada patamar da primeira etapa, é realizada uma variação na abertura do distribuidor e coletados os dados, para no mínimo 6 posições de abertura do distribuidor. Para cada alteração na posição do distribuidor é necessário aguardar a estabilização da unidade geradora para a coleta dos dados. O tempo utilizado nesta etapa varia entre 6 a 8 horas.

Finalizada as duas etapas do ensaio, é realizada a retirada da instrumentação da unidade geradora, levando aproximadamente 4 horas.

Após o ensaio é realizado o processamento e análise dos dados coletados. Com os resultados obtidos pelas planilhas, é gerado a curva de conjugação utilizada pelo regulador de velocidade, gráfico de rendimento da turbina para comparar com o rendimento fornecido pelo fabricante e gráfico com os rendimentos de cada combinação de posições das aberturas do distribuidor e rotor, para verificar se a curva de conjugação instalada está otimizada e caso não esteja, é levantada uma nova curva de conjugação a partir dos resultados da segunda etapa do ensaio.

Também é realizada a análise da incerteza de medição a partir dos dados de calibração dos instrumentos utilizados nos ensaios e a análise dos dados de vibração e oscilação do eixo, para verificar se, para estas variáveis, as condições operacionais da unidade geradora estão dentro dos limites operacionais de projeto. Após a etapa para analisar os dados e obter os resultados do ensaio, é realizado a elaboração do relatório. O tempo médio utilizado para a análise e processamento dos dados, geração de gráficos e para a confecção do relatório é de 40 horas.

**APÊNDICE II - RESULTADOS OBTIDOS PELA PLANILHA PRINCIPAL NO
ENSAIO OFFCAM**

RESULTADOS OBTIDOS PELA PLANILHA COM DADOS PARA ABERTURA DE 2,91%

	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	
7	Dados da Usina:															mca	21,42	2%		Q = K . √Δh m³/s-para	
8	diâmetro de entrada da turbina:					Áreas adotadas cf relatório ensaio do fabricante:					m	m³/s									
9	área de entrada:				UG13	relatório	292,21			217,73			m²	MW		Qp no ponto de rend					
10	área de saída da sucção com c		17,985	m	4 pás	idem	254,026			222,728			m²	mca	20,4	2%	Qp= Pt/ .rho . g . Hr .				
11	gravidade no local:9,7803(1+0,0053 sen²phi) - 0,000003 . Z										9,78			m/s²							
12	massa específica da água a 15,00 graus Celsius N rho =995,00 kg/m³										9731,1			N/m³	%						
13	latitude: - 8 GRAUS ;45 MIN																				
14	a1=altura do transd entrada em relação ao centro da turbina e cota da linha de centro (medido com												12,793			m		34,1	manm	encontrado:	
15	cota de inst da turbi		34,1		manm																
16	2-INDEX TEST DA UG#13-4 PÁS-GG2 - PLANILHA DE VALORES LIDOS E CALCULADOS-23/07/2019																		ηrel ou		
17	hora	NM	NJ	Hg	ab. Distr.	ab rotor	P1	P1	P2	P2	Hn	Hn2	delta h	Qt	Ph	Pg	rend ger	Peixo	Pe/raiz	rend	
18	local (-1h)	msnm	msnm	mca	%	%	bar	mca	bar	mca	mca	mca	mbar	m³/s	kW	kW	pu	kW	delta h	turb-pu	
28	10:29	70,47	49,01	21,46	40	2,91	2,287	23,502	0,229	2,35328	21,3771	21,3718	7,08	201,737	41955,6	35135	0,979	35888,66	13487,8	0,85540	
29	10:33	70,47	49,01	21,46	41,99	2,91	2,288	23,5122	0,229	2,35328	21,3869	21,3816	7,51	207,773	43230,7	37206	0,979	38004,09	13867,9	0,87910	
30	10:38	70,47	49,01	21,46	44	2,91	2,287	23,502	0,229	2,35328	21,3764	21,3711	7,69	210,248	43724,2	37961	0,979	38775,28	13982,7	0,88681	
31	10:44	70,47	49,01	21,46	46	2,91	2,287	23,502	0,228	2,343	21,3758	21,3808	8,26	217,901	45336,2	40077	0,979	40936,67	14243,7	0,90296	
32	10:48	70,47	49,01	21,46	48,01	2,91	2,286	23,4917	0,227	2,33273	21,365	21,3802	8,75	224,271	46660,4	40729	0,979	41602,66	14064,3	0,89161	
33	10:55	70,47	49,01	21,46	50	2,91	2,286	23,4917	0,227	2,33273	21,3648	21,3801	8,85	225,549	46926	41903	0,979	42801,84	14387,7	0,91211	
34	11:01	70,47	49,01	21,46	52	2,91	2,287	23,502	0,228	2,343	21,3747	21,3797	9,22	230,216	47896	42601	0,979	43514,81	14330,8	0,90853	

FONTE: O AUTOR (2019).

RESULTADOS OBTIDOS PELA PLANILHA COM DADOS PARA ABERTURA DE 9,41%

	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF			
7	Dados da Usina:																						
8	diâmetro de entrada da turbina:					Áreas adotadas cf relatório ensaio do fabricante:							m	m ³ /s						$Q = K \cdot \sqrt{\Delta h} \text{ m}^3/\text{s-para}$			
9	área de entrada:					UG13	relatório	292,21				217,73	m ²	MW						Qp no ponto de rend			
10	área de saída da sucção com $\epsilon = 17,985 \text{ m}$					4 pás	idem	254,026				222,728	m ²	mca	20,4	2%						$Qp = Pt / \rho \cdot g \cdot Hr \cdot$	
11	gravidade no local: $9,7803(1+0,0053 \text{ sen}^2\phi) - 0,000003 \cdot Z$											9,78	m/s ²										
12	massa específica da água a 15,00 graus Celsius $\rho = 995,00 \text{ kg/m}^3$											9731,1	N/m ³										
13	latitude: - 8 GRAUS ;45 MIN																						
14	a1=altura do transd entrada em relação ao centro da turbina e cota da linha de centro (medido com											12,793	m						34,1	manm	encontrado:		
15	cota de inst da turbi 34,1 manm																						
16	2-INDEX TEST DA UG#13-4 PÁS-GG2 - PLANILHA DE VALORES LIDOS E CALCULADOS-23/07/2019																						
17	hora	NM	NJ	Hg	ab. Distr.	ab rotor	P1	P1	P2	P2	Hn	Hn2	delta h	Qt	Ph	Pg	rend ger	Peixo	Pe/raiz	rend			
18	local (-1h)	msnm	msnm	mca	%	%	bar	mca	bar	mca	mca	mca	mbar	m ³ /s	kW	kW	pu	kW	delta h	turb-pu			
37	11:32	70,46	49,06	21,40	45,7	9,41	2,285	23,4814	0,230	2,36356	21,317	21,3383	9,49	233,562	48498,1	42261	0,98	43123,47	13998,5	0,88918			
38	11:36	70,46	49,06	21,40	47,69	9,41	2,285	23,4814	0,230	2,36356	21,3172	21,3378	9,95	239,156	49658,4	44448	0,98	45355,1	14378,5	0,91334			
39	11:43	70,46	49,06	21,40	49,68	9,41	2,284	23,4711	0,231	2,37383	21,307	21,3168	10,31	243,444	50499,1	45453	0,98	46380,61	14444,7	0,91844			
40	11:48	70,46	49,06	21,40	51,69	9,41	2,285	23,4814	0,227	2,33273	21,3174	21,3675	10,93	250,657	52119	47008	0,98	47967,35	14508,9	0,92034			
41	11:52	70,46	49,06	21,40	53,69	9,41	2,285	23,4814	0,228	2,343	21,3176	21,3566	11,52	257,333	53479,8	48097	0,98	49078,57	14459,9	0,91770			

FONTE: O AUTOR (2019).

RESULTADOS OBTIDOS PELA PLANILHA COM DADOS PARA ABERTURA DE 15,9%

	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF		
7	Dados da Usina:															mca	21,42	2%		$Q = K \cdot \sqrt{\Delta h} \text{ m}^3/\text{s}$ -para		
8	diâmetro de entrada da turbina:					Áreas adotadas cf relatório ensaio do fabricante:							m	m^3/s								
9	área de entrada:			UG13		relatório	292,21				217,73		m^2	MW						Q_p no ponto de rend		
10	área de saída da sucção com c			17,985	m	4 pás	idem	254,026			222,728		m^2	mca	20,4	2%				$Q_p = P_t / \rho \cdot g \cdot H_r$		
11	gravidade no local: $9,7803(1+0,0053 \text{ sen}^2\phi) - 0,000003 \cdot Z$											9,78	m/s^2									
12	massa específica da água a 15,00 graus Celsius $\rho = 995,00 \text{ kg}/\text{m}^3$											9731,1	N/m^3	%								
13	latitude: - 8 GRAUS ;45 MIN																					
14	a1=altura do transd entrada em relação ao centro da turbina e cota da linha de centro (medido com											12,793	m			34,1	manm	encontrado:				
15	cota de inst da turbi 34,1 manm																					
16	2-INDEX TEST DA UG#13-4 PÁS-GG2 - PLANILHA DE VALORES LIDOS E CALCULADOS-23/07/2019																			η_{rel} ou		
17	hora	NM	NJ	Hg	ab. Distr.	ab rotor	P1	P1	P2	P2	Hn	Hn2	delta h	Qt	Ph	Pg	rend ger	Peixo	Pe/raiz	rend		
18	local (-1h)	msnm	msnm	mca	%	%	bar	mca	bar	mca	mca	mca	mbar	m^3/s	kW	kW	pu	kW	delta h	turb-pu		
46	12:05	70,46	49,04	21,42	51,24	15,9	2,285	23,4814	0,225	2,31217	21,3378	21,3867	12,2	264,819	55113,1	48927	0,983	49773,14	14250	0,90311		
47	12:10	70,46	49,04	21,42	53,24	15,9	2,285	23,4814	0,228	2,343	21,338	21,3549	13,06	273,994	56937,8	51110	0,983	51993,9	14387,3	0,91317		
48	12:18	70,46	49,04	21,42	55,24	15,9	2,284	23,4711	0,228	2,343	21,3278	21,3443	13,35	277,019	57537,9	52900	0,983	53814,85	14728,6	0,93529		
49	12:22	70,46	49,04	21,42	57,24	15,9	2,283	23,4609	0,228	2,343	21,3177	21,3333	13,99	283,582	58870,6	53689	0,983	54617,5	14602,4	0,92776		
50	12:27	70,46	49,04	21,42	59,25	15,9	2,283	23,4609	0,227	2,33273	21,3178	21,3432	14,28	286,506	59505,4	54460	0,983	55401,83	14660,9	0,93104		

FONTE: O AUTOR (2019).

RESULTADOS OBTIDOS PELA PLANILHA COM DADOS PARA ABERTURA DE 22,91%

	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF									
7	Dados da Usina:															mca	21,42	2%		$Q = K \cdot \sqrt{\Delta h} \text{ m}^3/\text{s-para}$									
8	diâmetro de entrada da turbina:					Áreas adotadas cf relatório ensaio do fabricante:							m																
9	área de entrada:					UG13	relatório	292,21				217,73		m ²		MW					Qp no ponto de rend								
10	área de saída da sucção com c					17,985	m	4 pás	idem	254,026				222,728		m ²	mca	20,4	2%		Qp= Pt/ .rho . g . Hr .								
11	gravidade no local: $9,7803(1+0,0053 \text{ sen}^2\phi) - 0,000003 \cdot Z$													9,78		m/s ²													
12	massa específica da água a 15,00 graus Celsius $N \rho = 995,00 \text{ kg/m}^3$													9731,1		N/m ³	%												
13	latitude: - 8 GRAUS ;45 MIN																												
14	a1=altura do transd entrada em relação ao centro da turbina e cota da linha de centro (medido com											12,793		m				34,1	manm	encontrado:									
15	cota de inst da turbi 34,1 manm																												
16	2-INDEX TEST DA UG#13-4 PÁS-GG2 - PLANILHA DE VALORES LIDOS E CALCULADOS-23/07/2019																												$\eta_{\text{rel ou}}$
17	hora	NM	NJ	Hg	ab. Distr.	ab rotor	P1	P1	P2	P2	Hn	Hn2	delta h	Qt	Ph	Pg	rend ger	Peixo	Pe/raiz	rend									
18	local (-1h)	msnm	msnm	mca	%	%	bar	mca	bar	mca	mca	mca	mbar	m ³ /s	kW	kW	pu	kW	delta h	turb-pu									
54	12:44	70,45	49,05	21,40	55,31	22,91	2,282	23,4506	0,231	2,37383	21,2979	21,2904	15,57	299,167	61981,3	55601	0,984	56505,08	14320	0,91165									
55	12:48	70,45	49,05	21,40	57,31	22,91	2,281	23,4403	0,232	2,38411	21,2878	21,2692	16,2	305,16	63159,7	57920	0,984	58861,79	14624,3	0,93195									
56	12:52	70,45	49,05	21,40	59,31	22,91	2,279	23,4198	0,230	2,36356	21,2675	21,2681	17,15	313,98	64982	59610	0,984	60579,27	14628,2	0,93225									
57	12:56	70,45	49,05	21,40	61,3	22,91	2,281	23,4403	0,231	2,37383	21,2882	21,2779	17,61	318,163	65877,9	60900	0,984	61890,24	14748,3	0,93947									
58	13:00	70,45	49,05	21,40	63,33	22,91	2,281	23,4403	0,231	2,37383	21,2883	21,2772	18,27	324,07	67098,7	61509	0,984	62509,15	14624,3	0,9316									

FONTE: O AUTOR (2019).

RESULTADOS OBTIDOS PELA PLANILHA COM DADOS PARA ABERTURA DE 29,93%

	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF				
7	Dados da Usina:															mca	21,42	2%		Q = K . √Δh m³/s-para				
8	diâmetro de entrada da turbina:					Áreas adotadas cf relatório ensaio do fabricante:						m	m³/s											
9	área de entrada:				UG13	relatório	292,21				217,73		m²		MW					Qp no ponto de rend				
10	área de saída da sucção com c		17,985	m	4 pás	idem	254,026				222,728		m²		mca	20,4	2%			Qp= Pt/ .rho . g . Hr .				
11	gravidade no local:9,7803(1+0,0053 sen²phi) - 0,000003 . Z												9,78											
12	massa específica da água a 15,00 graus Celsius N rho =995,00 kg/m³												9731,1											
13	latitude: - 8 GRAUS ;45 MIN																							
14	a1=altura do transd entrada em relação ao centro da turbina e cota da linha de centro (medido com											12,793		m				34,1	manm	encontrado:				
15	cota de inst da turbi		34,1		manm																			
16	2-INDEX TEST DA UG#13-4 PÁS-GG2 - PLANILHA DE VALORES LIDOS E CALCULADOS-23/07/2019																							ηrel ou
17	hora	NM	NJ	Hg	ab. Distr.	ab rotor	P1	P1	P2	P2	Hn	Hn2	delta h	Qt	Ph	Pg	rend ger	Peixo	Pe/raiz	rend				
18	local (-1h)	msnm	msnm	mca	%	%	bar	mca	bar	mca	mca	mca	mbar	m³/s	kW	kW	pu	kW	delta h	turb-pu				
62	13:15	70,45	49,06	21,39	58,66	29,93	2,281	23,4403	0,233	2,39439	21,2786	21,2555	19,29	332,994	68876,1	62229	0,9845	63208,74	14391,7	0,91772				
63	13:19	70,45	49,06	21,39	60,65	29,93	2,281	23,4403	0,233	2,39439	21,2789	21,2545	20,2	340,757	70478,6	63619	0,9845	64620,62	14377,9	0,91688				
64	13:23	70,45	49,06	21,39	62,64	29,93	2,280	23,43	0,233	2,39439	21,2688	21,2432	21,07	348,018	71942,2	66135	0,9845	67176,23	14634,7	0,93375				
65	13:29	70,45	49,06	21,39	64,64	29,93	2,278	23,4095	0,231	2,37383	21,2484	21,2427	21,56	352,042	72772,1	67455	0,9845	68517,01	14756,2	0,94153				
66	13:33	70,45	49,06	21,39	66,66	29,93	2,278	23,4095	0,229	2,35328	21,2486	21,2625	22,19	357,148	73896,7	67631	0,9845	68695,78	14583,2	0,92962				

FONTE: O AUTOR (2019).

RESULTADOS OBTIDOS PELA PLANILHA COM DADOS PARA ABERTURA DE 37,94%

	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF								
7	Dados da Usina:															mca	21,42	2%		$Q = K \cdot \sqrt{\Delta h} \text{ m}^3/\text{s}$ -para								
8	diâmetro de entrada da turbina:					Áreas adotadas cf relatório ensaio do fabricante:							m		m^3/s													
9	área de entrada:				UG13	relatório	292,21				217,73		m^2		MW					Q_p no ponto de rend								
10	área de saída da sucção com		17,985	m	4 pás	idem	254,026				222,728		m^2		mca	20,4	2%			$Q_p = P_t / \rho \cdot g \cdot H_r$								
11	gravidade no local: $9,7803(1+0,0053 \text{ sen}^2\phi) - 0,000003 \cdot Z$											9,78		m/s^2														
12	massa específica da água a 15,00 graus Celsius $\rho = 995,00 \text{ kg}/\text{m}^3$											9731,1		N/m^3		%												
13	latitude: - 8 GRAUS ;45 MIN																											
14	a1=altura do transd entrada em relação ao centro da turbina e cota da linha de centro (medido com											12,793		m				34,1	manm	encontrado:								
15	cota de inst da turbi		34,1			manm																						
16	2-INDEX TEST DA UG#13-4 PÁS-GG2 - PLANILHA DE VALORES LIDOS E CALCULADOS-23/07/2019																											η_{rel} ou
17	hora	NM	NJ	Hg	ab. Distr.	ab rotor	P1	P1	P2	P2	Hn	Hn2	delta h	Qt	Ph	Pg	rend ger	Peixo	Pe/raiz	rend								
18	local (-1h)	msnm	msnm	mca	%	%	bar	mca	bar	mca	mca	mca	mbar	m^3/s	kW	kW	pu	kW	delta h	turb-pu								
70	13:47	70,46	49,05	21,41	64,42	37,94	2,278	23,4095	0,232	2,38411	21,2594	21,2283	25,23	380,828	78669,4	71452	0,9866	72422,46	14418,3	0,92059								
71	13:50	70,46	49,05	21,41	65,42	37,94	2,277	23,3992	0,230	2,36356	21,2493	21,2378	25,9	385,851	79742,9	73800	0,9866	74802,35	14698,2	0,93804								
72	13:54	70,46	49,05	21,41	66,41	37,94	2,276	23,3889	0,235	2,41494	21,2392	21,1756	26,4	389,558	80273	74696	0,9866	75710,52	14735,1	0,94316								
73	13:58	70,46	49,05	21,41	67,41	37,94	2,276	23,3889	0,234	2,40466	21,2394	21,1849	27,3	396,142	81665,6	74960	0,9866	75978,11	14541,4	0,93036								
74	14:01	70,46	49,05	21,41	68,44	37,94	2,277	23,3992	0,232	2,38411	21,2496	21,2161	26,92	393,375	81214,9	75294	0,9866	76316,64	14709	0,93969								

FONTE: O AUTOR (2019).

APÊNDICE III - INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Segundo a norma IEC-60041 a incerteza de medição para a potência ativa (e_{Pg}) pode ser obtida por:

$$e_{Pg} = \pm \sqrt{3 \cdot e_{TP}^2 + 3 \cdot e_{TC}^2 + 3 \cdot e_W^2}$$

Onde,

e_{TP} – Incerteza do transformador de potência;

e_{TC} – Incerteza do transformador de corrente;

e_W – Incerteza do Wattímetro;

Para a incerteza da potência útil da turbina (e_{Pe}), o valor é obtido por:

$$e_{Pe} = \pm \sqrt{e_{Pg}^2 + e_{\eta g}^2}$$

De acordo com a IEC-60041, para a incerteza da vazão relativa (e_Q) pode-se assumir o valor de $\pm 1,5\%$.

Para a incerteza da queda líquida, o valor é calculado por:

$$e_{HL} = \frac{\sqrt{\left(\frac{P_1 \cdot e_{P1}}{\rho \cdot g}\right)^2 + e_{z1}^2 + \left(\frac{P_2 \cdot e_{P2}}{\rho \cdot g}\right)^2 + e_{z2}^2 + \left(\left(\frac{Q^2}{g \cdot A_1}\right)^2 + \left(\frac{Q^2}{g \cdot A_2}\right)^2\right) \cdot e_Q^2} + \left(\frac{Q^2 \cdot e_{A1}}{g \cdot A_1}\right)^2 + \left(\frac{Q^2 \cdot e_{A2}}{g \cdot A_2}\right)^2}}{H_L}$$

A incerteza do rendimento relativo é dada por:

$$e_{\eta t} = \pm \sqrt{e_{Pe}^2 + e_Q^2 + e_{HL}^2}$$

Para o cálculo da incerteza do rendimento relativo do ensaio, foram considerados os valores apresentados pela seguinte tabela:

DADOS UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DA INCERTEZA
FONTE: AUTOR (2019).

e_{TP}	0,20%
e_{TC}	0,20%
e_W	0,058%
$e_{\eta t}$	1%
e_Q	1,5%
e_{P1}	0,54%
e_{P2}	0,05%
e_{z1}	1%
e_{z2}	1%
e_{A1}	1%
e_{A2}	1%

APÊNDICE IV - MODELOS E RESULTADOS OBTIDOS PELA REGRESSÃO POLINOMIAL

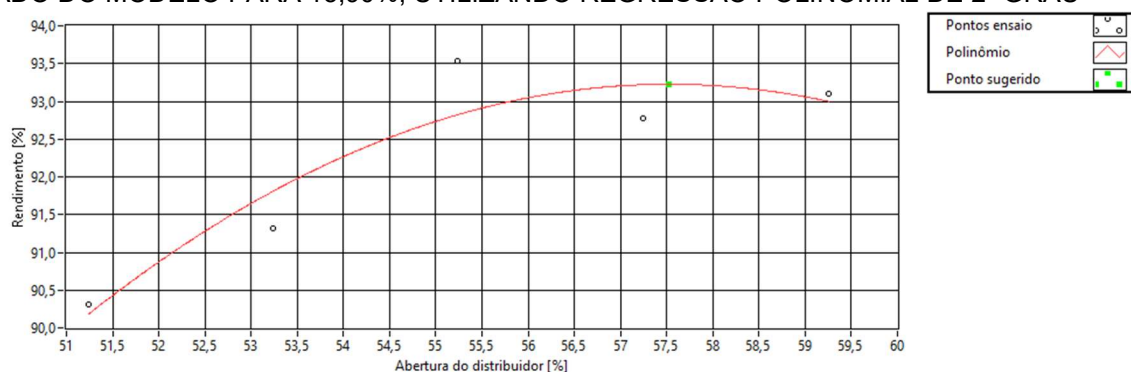
MODELOS OBTIDOS UTILIZANDO REGRESSÃO POLINOMIAL DE 2º GRAU
FONTE: AUTOR (2019).

Abertura do rotor	Modelo
15,90%	$-7,70 \cdot 10^4 \cdot x^2 + 0,09 \cdot x - 1,62$
22,91%	$-8,79 \cdot 10^4 \cdot x^2 + 0,11 \cdot x - 2,30$
29,93%	$-5,60 \cdot 10^4 \cdot x^2 + 0,07 \cdot x - 1,42$
37,94%	$-2,44 \cdot 10^3 \cdot x^2 + 0,33 \cdot x - 10,04$

MODELOS OBTIDOS UTILIZANDO REGRESSÃO POLINOMIAL DE 4º GRAU
FONTE: AUTOR (2019).

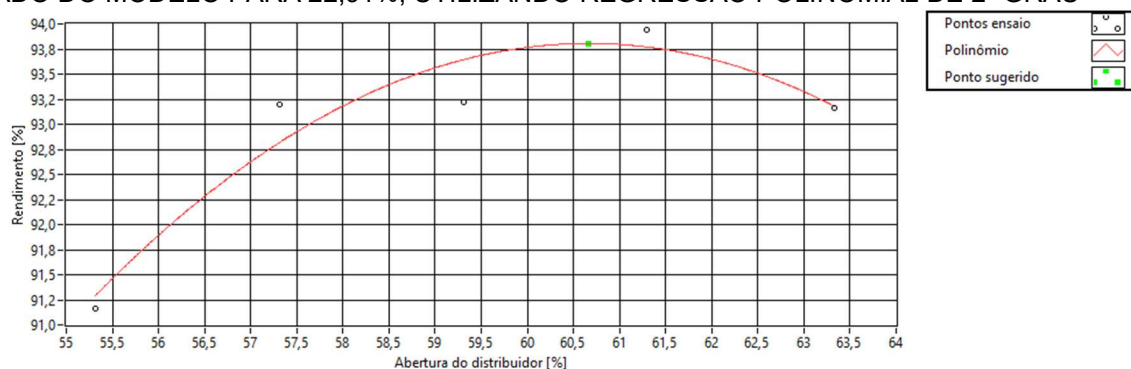
Abertura do rotor	Modelo
15,90%	$2,13 \cdot 10^4 \cdot x^4 - 4,72 \cdot 10^2 \cdot x^3 + 3,90 \cdot x^2 - 143,50 \cdot x + 1976,24$
22,91%	$-1,27 \cdot 10^4 \cdot x^4 + 0,03 \cdot x^3 - 2,69 \cdot x^2 + 106,34 \cdot x - 1576,30$
29,93%	$4,61 \cdot 10^5 \cdot x^4 - 0,01 \cdot x^3 + 1,16 \cdot x^2 - 49,85 \cdot x + 802,93$
37,94%	$1,72 \cdot 10^3 \cdot x^4 - 0,45 \cdot x^3 + 45,04 \cdot x^2 - 1981,24 \cdot x + 32672,96$

RESULTADO DO MODELO PARA 15,90%, UTILIZANDO REGRESSÃO POLINOMIAL DE 2º GRAU



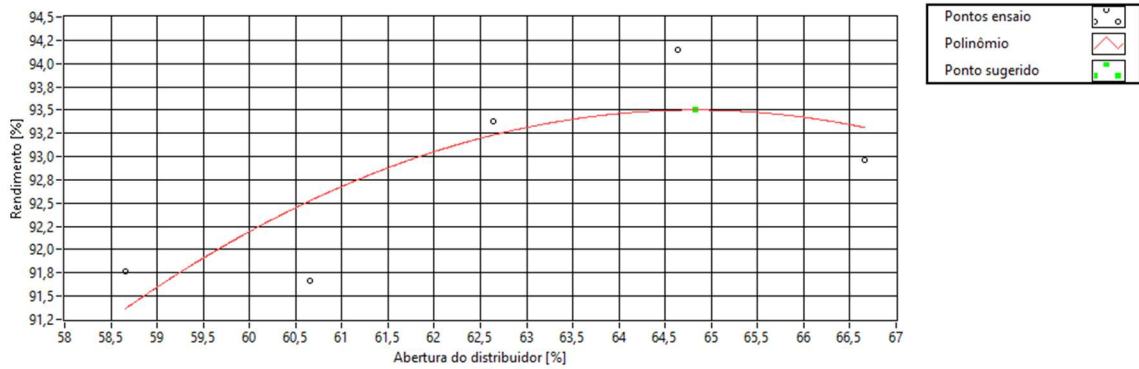
FONTE: AUTOR (2019).

RESULTADO DO MODELO PARA 22,91%, UTILIZANDO REGRESSÃO POLINOMIAL DE 2º GRAU



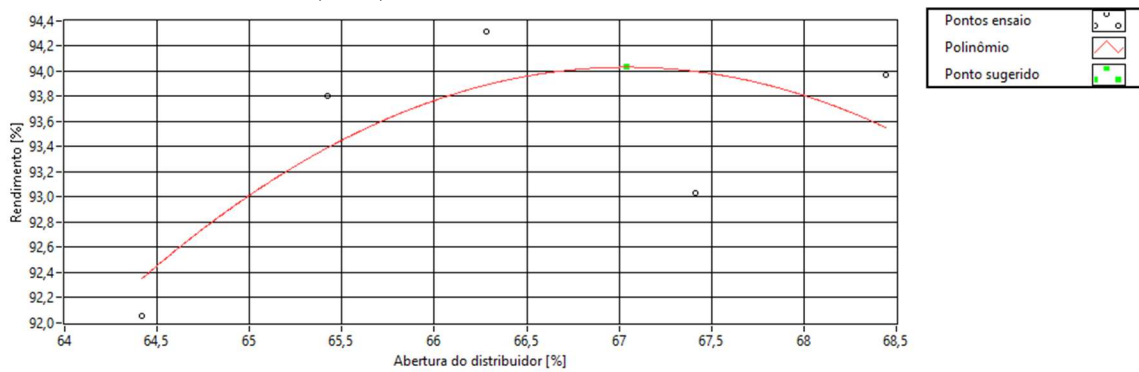
FONTE: AUTOR (2019).

RESULTADO DO MODELO PARA 29,93%, UTILIZANDO REGRESSÃO POLINOMIAL DE 2º GRAU



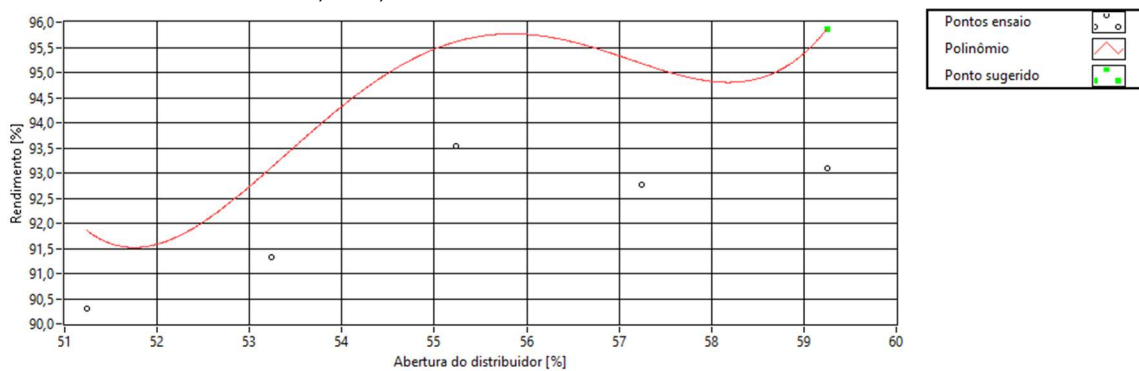
FONTE: AUTOR (2019).

RESULTADO DO MODELO PARA 37,94%, UTILIZANDO REGRESSÃO POLINOMIAL DE 2º GRAU



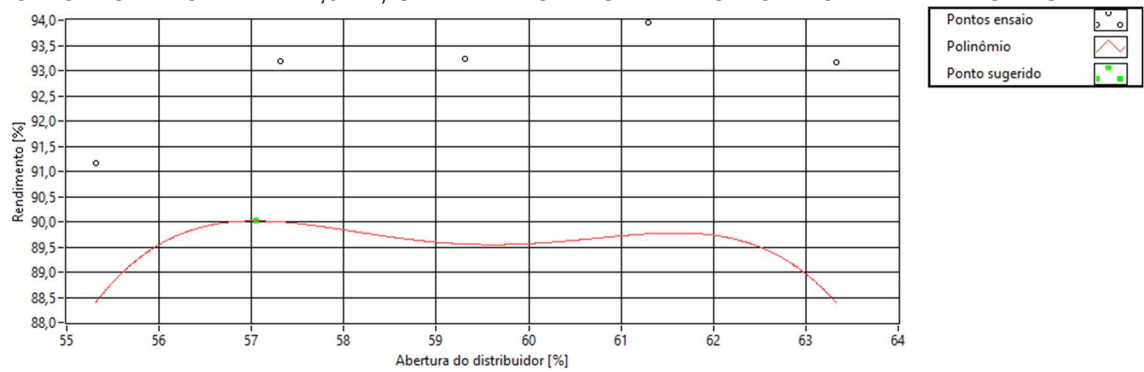
FONTE: AUTOR (2019).

RESULTADO DO MODELO PARA 15,90%, UTILIZANDO REGRESSÃO POLINOMIAL DE 4º GRAU



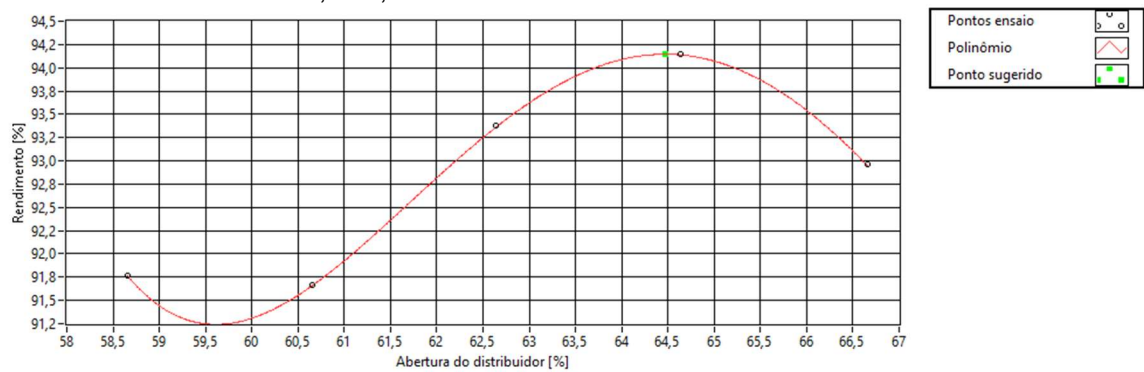
FONTE: AUTOR (2019).

RESULTADO DO MODELO PARA 22,91%, UTILIZANDO REGRESSÃO POLINOMIAL DE 4º GRAU



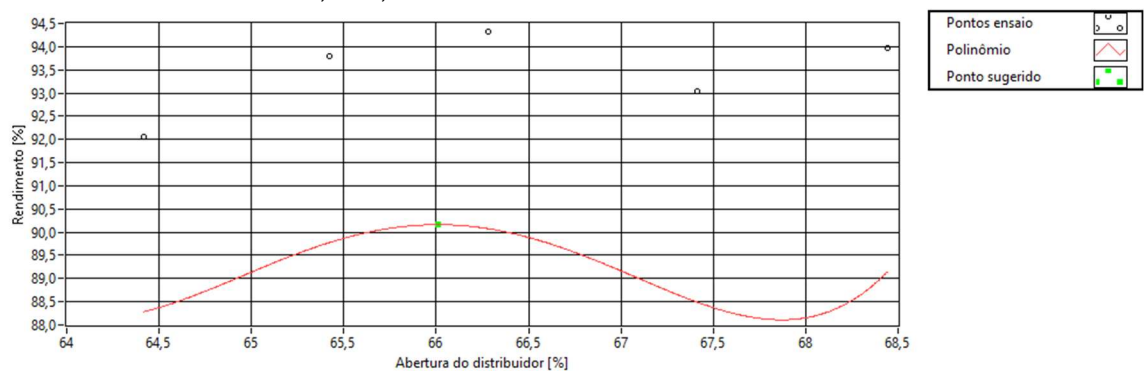
FONTE: AUTOR (2019).

RESULTADO DO MODELO PARA 29,93%, UTILIZANDO REGRESSÃO POLINOMIAL DE 4º GRAU



FONTE: AUTOR (2019).

RESULTADO DO MODELO PARA 37,94%, UTILIZANDO REGRESSÃO POLINOMIAL DE 4º GRAU



FONTE: AUTOR (2019).