

Universidade de São Paulo – USP
Escola De Engenharia De São Carlos
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação

THALES AUGUSTO FAGUNDES

**Simulação de uma Máquina
Geotérmica Ciclo Binário para
Alimentação de um Gerador**

São Carlos
2016

THALES AUGUSTO FAGUNDES

**Simulação de uma Máquina
Geotérmica Ciclo Binário para
Alimentação de um Gerador**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo.

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em
Sistemas de Energia e Automação.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ricardo Quadros Machado

São Carlos
2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

F151s Fagundes, Thales Augusto
Simulação de uma Máquina Geotérmica Ciclo Binário
para Alimentação de um Gerador / Thales Augusto
Fagundes; orientador Dr. Ricardo Quadros Machado. São
Carlos, 2016.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2016.

1. Ciclo de Rankine. 2. DAQ. 3. EES. 4. Fluido
Secundário. 5. Geofluido. 6. Inversor. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Thales Augusto Fagundes

Título: “Simulação de uma máquina geotérmica ciclo binário para alimentação de um gerador”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 18 / 11 / 2016,

com NOTA 9,0 (nove, zero), pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Ricardo Quadros Machado - Orientador - SEL/EESC/USP

Mestre Rodolpho Vilela Aves Neves - Doutorando-SEL/EESC/USP

Mestre Klebber de Araújo Ottoboni - Doutorando-SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior

Dedico este trabalho aos meus pais, irmãos e avô.

Agradecimentos

Agradeço à Universidade de São Paulo pelos conhecimentos adquiridos desde o ingresso no curso de Engenharia Elétrica.

À CAPES pela oportunidade concedida de realizar o intercâmbio pelo programa governamental *Ciências sem Fronteiras*.

Agradeço à FAPESP pelo apoio financeiro à minha pesquisa.

Agradeço também ao meu orientador Dr. Ricardo Quadros Machado pelo apoio e auxílio no Laboratório de Fontes Alternativas e Processamento de Energia (LAFAPE-USP).

Agradeço ao Willian Fernandes, Guilherme Fuzato e Renan Bastos por me auxiliarem em meu projeto.

Agradeço à minha família pelo apoio ao longo de toda graduação.

Agradeço aos meus amigos Pedro Reis, Willian Takano, Rafael Abbade e Guilherme Radaelli pela convivência ao longo da graduação e por tornarem-se uma família.

Agradeço a todos os moradores da república Babilônia pelos momentos descontraídos ao longo de todo esse tempo e por formarmos uma grande família.

Agradeço a todas as amigas formadas ao longo de meu intercâmbio na Austrália.

*“Nossa maior fraqueza está em desistir. O caminho
mais certo de vencer é tentar mais uma vez”
(Thomas Edison)*

Fagundes, Thales Augusto. **Simulação de uma máquina geotérmica ciclo binário para alimentação de um gerador**. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2016.

Esse trabalho de conclusão de curso apresenta todas as etapas realizadas do projeto intitulado “simulação de uma máquina geotérmica ciclo binário para alimentação de um gerador”. Tal projeto visa analisar uma máquina de indução trifásica utilizada para emular o comportamento de um sistema geotérmico de geração de energia elétrica. Para o controle e acionamento da máquina elétrica, é utilizado um inversor de frequência WEG CFW100 com um acoplamento para entradas analógicas.

Uma estrutura de gerenciamento, escrita em linguagem gráfica programável de alto nível no programa LabView, embarcada em um dispositivo de aquisição de dados DAQ (NI-USB-6008) de alto desempenho, irá transmitir o sinal ao inversor. Os estudos foram realizados de modo que se possa obter uma aproximação entre o sistema emulado (acionamento de uma máquina elétrica) e o dispositivo real (comportamento do sistema geotérmico).

Dentre os principais tipos de máquinas geotérmicas, esse projeto avaliou apenas aquelas com geração de energia elétrica por meio do ciclo binário, ou seja, via ciclo orgânico de RANKINE. Tal escolha é decorrente do fato de que este tipo de dispositivo utiliza o fluido primário (geotérmico) com baixo ponto de ebulição e pode ser utilizado para aquecer um fluido secundário em locais nos quais o geofluido possui baixas temperaturas. Para encontrar os valores de entalpia dos gases, foi utilizado o software “EES – Engineering Equation Solver” enquanto que o controle do sistema e a interação entre a simulação e a máquina elétrica serão feitos através do inversor de frequência.

Palavras-chave: Ciclo de Rankine, DAQ, EES, Fluido Secundário, Geofluido, Inversor.

Abstract

Fagundes, Thales Augusto. **Simulation of a geothermal machine operating in a binary cycle to supply a generator**. Final Course Assignment –São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2016.

This final course assignment will provide a "simulation of a geothermal machine operating in a binary cycle to supply a generator". Additionally, an induction machine will be used to emulate the behaviour of a geothermal system for power generation. A frequency inverter from WEG CFW100 in association with an expansion module for analogic inputs will be used to control the machine.

First and foremost, a graphic structure will be used in a programmable language of high-level LabView software and will be embedded in a data acquisition device DAQ (NI-USB-6008). Additionally, this device will transmit an analog signal to the inverter. In this context, researches were made to obtain an approximation between the emulated system (an electric machine drive) and real device (geothermal system behaviour).

Due to the primary fluid (geothermal) with low boiling point in Brazil, it was choosing a geothermal system that used a binary cycle with a Rankine organic cycle. Indeed, a secondary fluid with a high boiling point will be used in the system, so the project can be used in sites with water at low temperatures. Finally, the software "EES - Engineering Equation Solver" was used to find thermodynamic parameters and the interaction between the simulation and the electric machine will be made by the frequency inverter.

Keywords: Rankine Cycle, DAQ, EES, Secondary Fluid, Geothermal Fluid, inverter.

Lista de ilustrações

Figura 1: Controle do sistema geotérmico	12
Figura 2: Método Vapor Seco com escape atmosférico [23]	14
Figura 3: Método Vapor Seco com condensador [23]	15
Figura 4: Método Vapor Flash [23]	15
Figura 5: Extração da energia geotérmica através do ciclo binário [23]	16
Figura 6: Exemplo de uma máquina operando num ciclo de rankine [6]	20
Figura 7: Relação de temperatura pela entropia da água, com pontos demarcando o ciclo de Rankine [7].	22
Figura 8: Máquina Geotérmica com ciclo binário que será simulada.	24
Figura 9: descrição do processo de interpolação [12].	26
Figura 10: Gás sofrendo expansão – trabalho realizado pelo gás é positivo	34
Figura 11: Gás sofrendo compressão – trabalho realizado pelo gás é negativo	34
Figura 12: Malha de Controle descrevendo o funcionamento do governador [13].	37
Figura 13: Malha de Controle descrevendo ação do inversor que é semelhante à operação do governador.	38
Figura 14: Princípio de operação do inversor CFW100 [22]	39
Figura 15: Inversor CFW100 junto com módulo de expansão para sinais analógicos	39
Figura 16: Diagrama Controle Vetorial Sensorless	41
Figura 17: Diagrama Temperatura x Entropia do N-Pentano	45
Figura 18: Diagrama T-s mostrando a influência na variação de pressão no ciclo de Rankine	48
Figura 19: Diagrama T-s mostrando a influência na variação de temperatura da fonte geotérmica no ciclo de Rankine	49
Figura 20: Ciclo de Rankine Orgânico para o caso do geofluido a 100°C e pressão de 1000 kPa na saída da bomba do ciclo secundário obtido pelo software EES	50
Figura 21: Diagrama T-s do gráfico da Figura 20 ampliado	50
Figura 22: Ciclo de Rankine Orgânico para o caso do geofluido a 151,8°C e pressão de 1000 kPa na saída da bomba do ciclo secundário obtido pelo software EES	52
Figura 23: Diagrama T-s do gráfico da Figura 22 ampliado	52
Figura 24: Ciclo de Rankine Orgânico para o caso do geofluido a 100°C e pressão de 1500 kPa na saída da bomba do ciclo secundário obtido pelo software EES	54
Figura 25: Diagrama T-s do gráfico da Figura 24 ampliado	54
Figura 26: Ciclo de Rankine Orgânico para o caso do geofluido a 151,8°C e pressão de 1500 kPa na saída da bomba do ciclo secundário obtido pelo software EES	56
Figura 27: Diagrama T-s do gráfico da Figura 26 ampliado	56

Figura 28: Ciclo de Orgânico de Rankine comparando uma potência máxima com uma potência nula obtido pelo software EES	57
Figura 29: Testes experimentais utilizando-se de cargas resistivas	58
Figura 30: Testes experimentais utilizando-se do potênciômetro	59
Figura 31: Gráfico indicando a variação da simulação em função da rotação	61
Figura 32: Gráfico indicando a variação da simulação em função da potência geotérmica simulada	62
Figura 33: Modelo completo da simulação do “ <i>Front Panel</i> ” do LabView	70
Figura 34: “ <i>Front Panel</i> ” do LabView mostrando a primeira parte da circulação do Geofluido	71
Figura 35: “ <i>Front Panel</i> ” do LabView mostrando a segunda parte da circulação do Geofluido	72
Figura 36: “ <i>Front Panel</i> ” do LabView mostrando a primeira parte da circulação do fluido secundário	73
Figura 37: “ <i>Front Panel</i> ” do LabView mostrando a segunda parte da circulação do fluido binário	74
Figura 38: Diagrama do LabView mostrando a escolha de vetores para a interpolação	75
Figura 39: Diagrama do LabView mostrando a simulação do bloco da interpolação	76

Lista de Tabelas

TABELA 1: PREÇOS DE KWH PARA DIFERENTES TIPOS DE OBTENÇÃO DE ENERGIA	12
TABELA 2: VALORES NOMINAIS DA MÁQUINA DE INDUÇÃO	42
TABELA 3: ESTADO DE CADA PONTO DE OPERAÇÃO DO FLUIDO GEOTÉRMICO	46
TABELA 4: ESTADO DE CADA PONTO DE OPERAÇÃO DO FLUIDO SECUNDÁRIO	47
TABELA 5: VALORES OBTIDOS NO CICLO BINÁRIO ATRAVÉS DAS SIMULAÇÕES	49
TABELA 6: VALORES OBTIDOS NO CICLO BINÁRIO ATRAVÉS DAS SIMULAÇÕES	51
TABELA 7: VALORES OBTIDOS NO CICLO BINÁRIO ATRAVÉS DAS SIMULAÇÕES	53
TABELA 8: VALORES OBTIDOS NO CICLO BINÁRIO ATRAVÉS DAS SIMULAÇÕES	55
TABELA 9: PRIMEIRO CENÁRIO EXPERIMENTAL	60
TABELA 10: SEGUNDO CENÁRIO EXPERIMENTAL	60
TABELA 11: TERCEIRO CENÁRIO EXPERIMENTAL	61

Lista de Siglas

ANEEL *Agência Nacional de Energia Elétrica*

EES *Engineering Equation Solver*

DAQ *Data acquisition*

MIT *máquina de indução trifásica*

Lista de Símbolos

MWt *Megawatt térmico*

MW *Megawatt*

CC *Corrente Contínua*

CA *Corrente Alternada*

\dot{Q} *taxa de transferência de energia por calor*

\dot{W} *taxa de transferência de energia por trabalho*

V *vazão*

\dot{m} *taxa de massa*

h *entalpia*

S *entropia*

η *eficiência*

P *pressão*

T *temperatura*

X *título (é a percentagem de massa de vapor numa mistura líquido-vapor)*

bar *unidade de pressão (1 bar equivale a 10^5 Pa)*

kPa *unidade de pressão em Pascal (equivale a 10^3 Pa)*

Vrms *tensão em RMS (root mean square)*

RPM *rotação por minuto*

kW *kilowatt*

HZ *Hertz*

Arms *corrente em RMS (root mean square)*

°C *graus celsius*

Vcc *tensão em corrente contínua*

M *mega (10^6)*

Sumário

1	Introdução	11
1.1	Objetivos	13
1.2	Estrutura do Trabalho	13
2	Tipos de extração da Energia Geotérmica	14
2.1	Vapor Seco	14
2.2	Vapor Flash	15
2.3	Ciclo Binário	16
2.4	Considerações Finais	17
3	Modelo Matemático da planta geotérmica estudada	23
4.1	Componentes do sistema	24
4.1.1	Circulação do Geofluido	24
4.1.2	Circulação do Fluido Binário	25
4.2	Interpolação Termodinâmica	25
4.3	Transformações sofridas pelo fluido geotérmico	26
4.4	Transformações sofridas pelo fluido secundário	31
4.5	Balanço Energético	34
5	Procedimento para a Elaboração do Projeto	37
5.1	Controle do Sistema Geotérmico	37
5.2	Inversor Trifásico da Marca WEG	38
5.3	Interação entre DAQ e Máquina de Indução Trifásica	39
5.4	Diagrama de Blocos: Controle Vetorial Sensorless	40
6	Simulações e Resultados	45
6.1	Simulações no LabView	45
6.2	Potência máxima produzida	46
6.2.1	Temperatura do Geofluido de 100°C e pressão de 1000 kPa na saída bomba do ciclo secundário	49
6.2.2	Temperatura do Geofluido de 151,8°C e pressão de 1000 kPa na saída bomba do ciclo secundário	51
6.2.3	Temperatura do Geofluido de 100°C e pressão de 1500 kPa na saída bomba do ciclo secundário	53
6.2.4	Temperatura do Geofluido de 151,8°C e pressão de 1500 kPa na saída bomba do ciclo secundário	55
6.2.5	Caso em que não ocorre produção de energia elétrica	57
6.3	Simulações de todo o sistema geotérmico em conjunto com o inversor	58

6.4 Resultados experimentais	59
6.5 Considerações finais	62
Conclusão	63
Referências Bibliográficas	65
Anexo	69

Capítulo 1

Introdução

A busca por formas alternativas de produção de energia elétrica está sendo bastante difundida uma vez que, procura-se substituir o uso de combustíveis fósseis [1]. Assim, é comum ocorrerem estudos na área de energia com o intuito de encontrar outras fontes como, por exemplo, a energia térmica que emprega como matéria prima um combustível biodegradável [1]. A energia vinda da biomassa é proveniente da energia da emissão da luz solar, enquanto que a energia geodésica é originária da alta entalpia (quantidade de calor armazenada em uma substância) da água e vapor de alta pressão no subsolo [1].

De acordo com o departamento de Geografia da Universidade de São Paulo, no processo de resfriamento, o calor do subsolo pode ser dissipado em qualquer ponto, com maiores intensidades nas fronteiras das placas tectônicas [2]. Nesse sentido, em lugares com grande potencial geotérmico, como na Nova Zelândia, Estados Unidos da América, Filipinas, Indonésia, México, Itália, Islândia há um grande interesse em estudos para viabilizar a implantação de sistemas geotérmicos para a produção de energia elétrica [3].

Enquanto isso, no Brasil, há apenas o uso da potência calorífica do subsolo para o aquecimento da água fazendo com que, o vasto potencial de produção de energia elétrica, via usina geotérmica, não seja aproveitado. Assim, uma avaliação mais apurada das energias de entalpia proveniente dos aquíferos brasileiros mostra que as mesmas se inserem nas categorias de baixa e média entalpia [4], razão pela qual o presente projeto de pesquisa será focado no estudo de máquinas geotérmicas com um fluido secundário de baixa ebulição. Embora não se encontrem estudos aprofundados no Brasil sobre a capacidade geotérmica, alguns trabalhos mostram uma estimativa do uso de cerca de 360 MWt para aquecimento de água e uso industrial [4].

Nesse contexto, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) não considera a produção de energia elétrica via dispositivos geotérmicos na matriz energética brasileira [4]. Porém, julgam-se necessários maiores estudos na área geotérmica a fim de criar mais perspectivas de fontes alternativas de energia no futuro e reduzir a dependência do uso de sistemas fósseis.

Para o desenvolvimento desse projeto utilizou-se a leitura dos dados de entalpia do fluido através do software EES (Engineering Equation Solver) de forma que se possa simular um ciclo Orgânico de Rankine pelo LabView e este, por sua vez, possa ser usado para enviar informações para manter a máquina elétrica funcionando como um dispositivo

geotérmico. Então, será utilizado um inversor de frequência que receberá o sinal analógico da simulação da máquina geotérmica e sua estrutura de controle vetorial sensorless manterá a rotação constante que assim emulará o comportamento do sistema geotérmico. Tal procedimento pode ser resumido na Figura 1.



Figura 1: Controle do sistema geotérmico

Além disso, de acordo com a tabela 1, percebe-se que os preços do kWh da energia geotérmica pode chegar próximo ao valor do preço da energia hidrelétrica e ser bem abaixo da energia eólica e solar.

Tabela 1: Preços de kWh para diferentes tipos de obtenção de energia

Comparação de Custos da Energia	
Tipo de Recurso	Custo médio (Centavos de US\$ por kWh)
Hidrelétrica	2-5
Nuclear	3-4
Carvão	4-5
Gás Natural	4-5
Vento	4-10
Geotérmica	5-8
Biomassa	8-12
Célula de Hidrogênio	10-15
Solar	15-35

Finalmente, a partir das informações citadas, julga-se necessário um estudo aprofundado da energia geotérmica, baseando-se em sua simulação através do software LabView com interação entre a máquina de indução trifásica com o uso do dispositivo da aquisição de dados (DAQ) e o inversor trifásico.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste projeto é a criação de um protótipo para emular o comportamento de uma fonte geotérmica. Além disso, serão apresentadas as principais metas para a realização do projeto.

- Analisar tipos de obtenção de energia através do fluido geotérmico;
- Promover o levantamento de dados de entalpia de um fluido para aproveitamento na geração de energia geotérmica;
- Simular, via LabView, o comportamento de uma máquina geotérmica do ciclo binário, buscando compreender o comportamento do fluido geotérmico com baixa entalpia;
- Controlar uma máquina de indução trifásica de forma que o seu comportamento emule um sistema geotérmico;
- Estudar e avaliar estruturas clássicas para o controle da máquina elétrica.

1.2 Estrutura do Trabalho

O trabalho prossegue com o Capítulo 2, que será responsável por introduzir as diferentes formas de obtenção de eletricidade a partir da energia geotérmica. Em seguida, é mostrado o modelo matemático do ciclo de Rankine para entendimento do projeto no Capítulo 3. Já o Capítulo 4 explica o modelo utilizado na simulação do LabView tratando sobre os componentes do sistema e as transformações sofridas pelo fluido geotérmico e o n-pentano. Em seguida, o Capítulo 5 trará uma abordagem sobre o controle do sistema geotérmico através da utilização do inversor de frequência e também a interação entre o LabView e a máquina de indução. Finalmente, o Capítulo 6 trará os resultados das simulação realizadas pelo LabView e a forma que adotou-se pela máxima potência em cada caso, além disso, mostra-se o experimento realizado no laboratório em conjunto com a máquina de indução e o gerador síncrono. Por fim, são consolidados as considerações finais e conclusões do trabalho.

Tipos de extração da Energia Geotérmica

Cada tipo de extração da energia proveniente do interior da Terra depende da análise das características do fluido e do local. Para análise do local de extração, deve-se estudar o tipo de solo e a devida forma de captação do fluido do interior da Terra e proteção da usina devido à altas pressões geotérmicas. Assim, dentre os meios de obtenção de eletricidade, existem os métodos de conversão “vapor seco”, “vapor flash” e o “ciclo binário” que serão descritos a seguir [3].

2.1 Vapor Seco

Os recursos geotérmicos através da captação de vapor seco são utilizados desde o século XX. Em tal processo, a fluido geotérmico (temperatura acima de 150 °C) é utilizado diretamente para alimentar uma turbina térmica, a qual irá rotacionar um gerador síncrono. Tal fluido pode passar por um separador de fases líquida e vapor dependendo se a turbina aceita mistura bifásica ou não (Figura 2).

As turbinas utilizadas podem ter um escape atmosférico para o vapor, enquanto que o fluido na fase líquida é injetado novamente no interior da Terra, para esse processo, a produção de energia elétrica é em torno de 5MW. Além disso, pode-se optar por turbinas sem escape atmosférico, como visto na Figura 3, assim, o fluido a vapor é condensado e injetado novamente ao interior da Terra, para tal processo, a produção de energia da usina é em torno de 60MW [23].

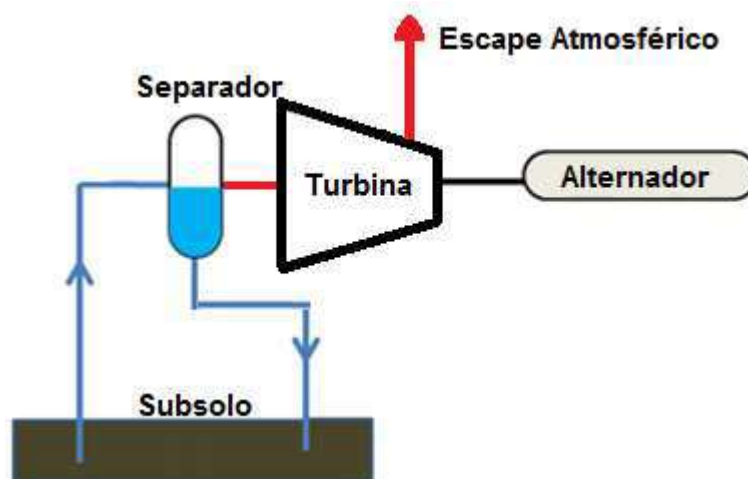


Figura 2: Método Vapor Seco com escape atmosférico [23]

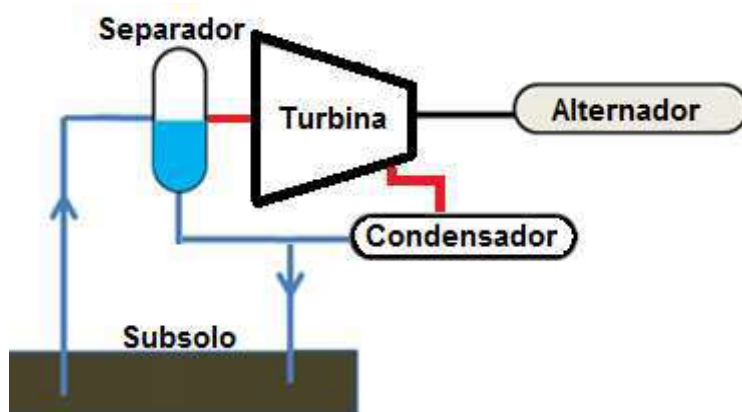


Figura 3: Método Vapor Seco com condensador [23]

2.2 Vapor Flash

Na Figura 4, o fluido geotérmico é predominantemente na fase líquida. Assim, quando ocorre a extração, o fluido passa por uma válvula redutora de pressão aumentando a concentração de vapor da mistura bifásica. Em seguida, a mistura bifásica passa pelo separador, a partir disso, a fase líquida é injetada na Terra e a parte na fase a vapor é utilizada para gerar energia mecânica na turbina. Por sua vez, o gerador síncrono acoplado à turbina converte a energia mecânica em energia elétrica.

Tal forma de extração é utilizada para fluidos com temperaturas acima de $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ [24].

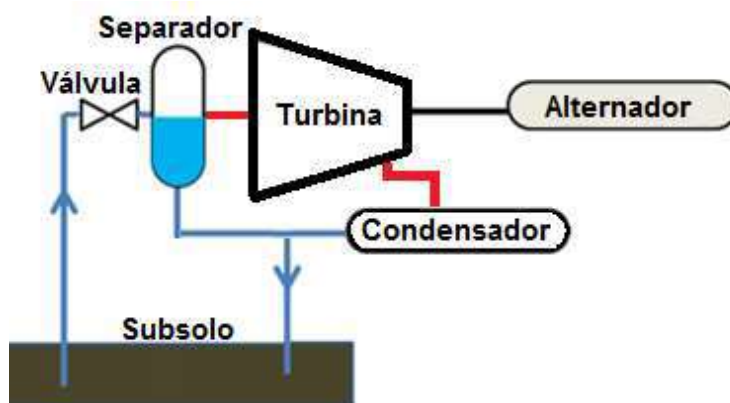


Figura 4: Método Vapor Flash [23]

2.3 Ciclo Binário

Nessa forma de extração, vista na Figura 5, o fluido geotérmico encontra-se em médias temperaturas (de 100 a 150 °C). Assim são utilizados dois fluidos, o geotérmico e um secundário, sendo que este último é orgânico, apresenta baixo ponto de ebulição e pressão a vapor elevada quando comparada ao vapor convencional.

O fluido orgânico é chamado de secundário pois recebe o calor do fluido vindo da Terra. Assim, num ciclo de Rankine Orgânico, há uma troca de calor entre o fluido geotérmico e o secundário (no caso da simulação será utilizado um n-pentano), então há uma elevação de temperatura do fluido orgânico que é utilizado para rotacionar uma turbina térmica que rotacionará um gerador síncrono. Em seguida, o fluido de trabalho é resfriado por um condensador, reiniciando o ciclo, enquanto que o fluido térmico é injetado novamente ao subsolo.

Em razão de existir lugares com baixos pontos de temperatura da água no Brasil, será simulado um sistema geotérmico do ciclo binário, pois há um maior aproveitamento de baixas entalpias. Além disso, não há emissão de gás carbônico e poluentes ao meio externo sendo um meio de fonte renovável limpa [24].

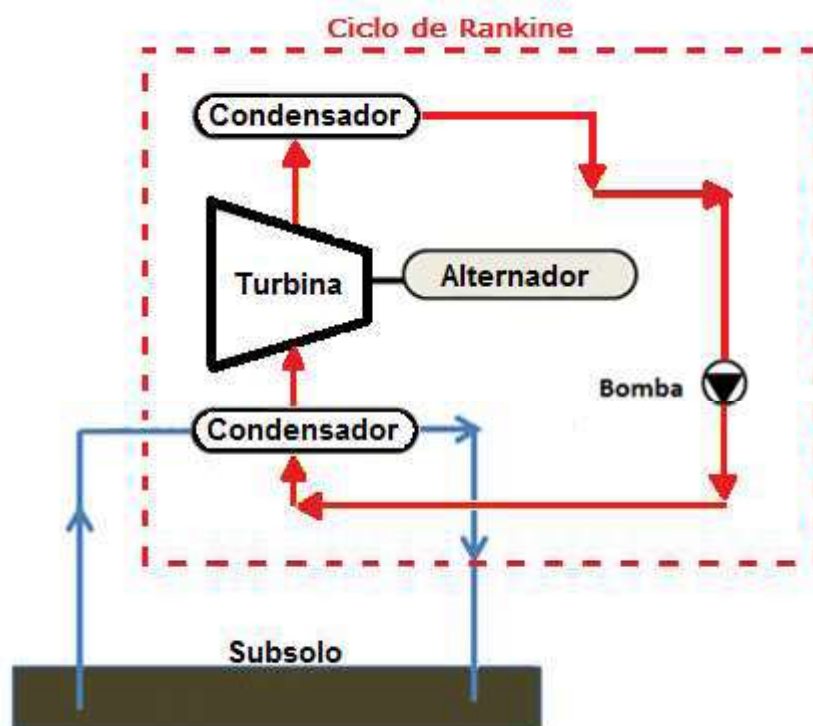


Figura 5: Extração da energia geotérmica através do ciclo binário [23]

2.4 Considerações Finais

Dentre os tipos de extração da energia geotérmica, o ciclo binário foi estudado em razão do cenário brasileiro apresentar fluidos térmicos considerados com baixas e médias entalpias. Em razão dessa escolha, foi estudado o ciclo Rankine para entender melhor os conceitos de conversão de energia térmica em energia elétrica. Além disso, o preço da energia geotérmica em comparação com as outras formas de obtenção justifica também o seu estudo.

Assim, foi possível elaborar uma simulação via LabView para transmitir um sinal para o DAQ que emite um sinal ao inversor e por fim controlar o motor de indução acoplado ao gerador síncrono.

Capítulo 3

Modelo Matemático de um ciclo de Rankine

Para o desenvolvimento do projeto em questão são realizadas simulações usando dados de entalpia como entrada do sistema. Assim, existirão manipulações para cálculo da potência da turbina no ciclo orgânico de Rankine. Um dispositivo receberá os dados de entalpia da energia geotérmica e emitirá um sinal analógico proporcional ao trabalho produzido que alimentará um inversor trifásico CC/CA controlando um motor de indução com o objetivo de replicar o comportamento geotérmico. Esse por sua vez, será conectado a um gerador síncrono com o objetivo de garantir uma maior estabilidade do sistema e produzir energia elétrica. Nesse contexto, é esperado que as simulações realizadas apresentem similaridades no controle da turbina da central geotérmica e que os resultados obtidos através do protótipo desenvolvido tenham as mesmas características de um sistema real.

Para o adequado funcionamento, o sistema geotérmico é baseado no seguinte princípio físico e que é descrito abaixo, isto é, para um volume de controle obtém-se a lei de conservação de energia termodinâmica, conforme é mostrado em (1).

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_e \left(u_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e \right) - \dot{m}_s \left(u_s + \frac{v_s^2}{2} + gz_s \right) \quad (1)$$

Onde \dot{Q} e \dot{W} representam as taxas de transferência de energia por calor e trabalho através do volume de controle, enquanto que os outros termos da equação descrevem a energia interna, cinética e potencial dos fluxos de entrada e saída. Nesse contexto, considerando o sistema geotérmico em estado permanente no volume de controle e conservação de energia cinética e potencial, a equação (1) pode ser reescrita conforme (2).

$$\dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_e h_e - \dot{m}_s h_s = 0 \quad (2)$$

Além disso, em estado de regime permanente para um líquido incompressível, a taxa de vazão é constante em qualquer ponto. Assim é possível encontrar a relação da equação (3):

$$Vazão\ de\ entrada = V_e A_e$$

$$Vazão\ de\ entrada = Vazão\ de\ saída$$

$$V_e A_e = V_s A_s \quad (3)$$

Onde V_e e V_s são as velocidades do fluido na entrada e na saída do volume de controle e A_e e A_s são as áreas seccionais percorridas pelo fluido na entrada e saída da fronteira do volume de controle respectivamente. Assim, multiplicando ambos os lados da equação por ' ρ ' (massa específica) encontra-se o valor da conservação da taxa de massa na equação (4):

$$\rho V_e A_e = \rho V_s A_s$$

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s \quad (4)$$

Portanto, a taxa de massa pode ser escrita apenas como ' \dot{m} ' na equação (5):

$$\dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_e h_e - \dot{m}_s h_s = 0$$

$$\dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}(h_e - h_s) = 0 \quad (5)$$

Após uma análise no modelo matemático, é possível mostrar o ciclo de Rankine de acordo com a Figura 6.

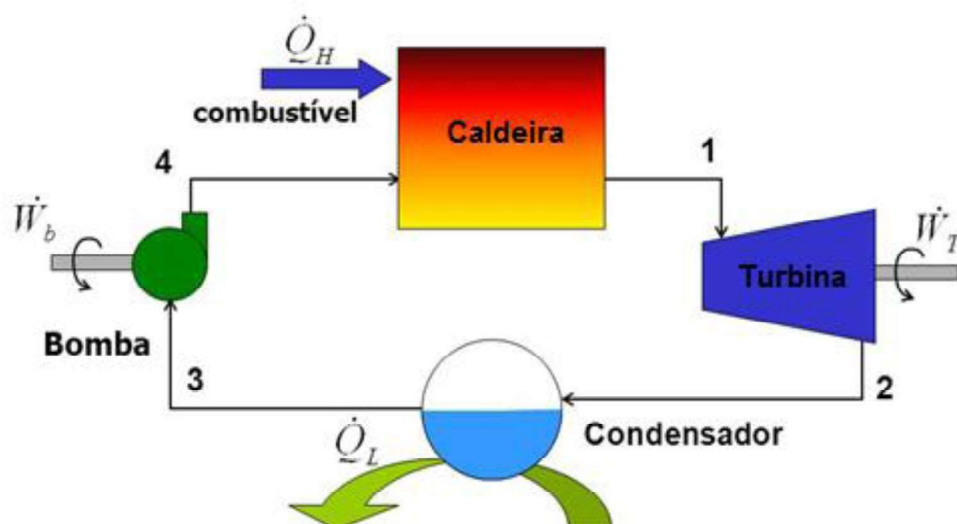


Figura 6: Exemplo de uma máquina operando num ciclo de rankine [6]

Ao entrar na turbina, o fluido aquecido na caldeira gera trabalho (W_T), numa transformação adiabática (sem troca de calor: $Q = 0$) e isoentrópica (conservação entropia). Resultando na equação (6):

$$\dot{W}_T = \dot{m}(h_1 - h_2) \quad (6)$$

Enquanto que os índices numéricos referem-se aos estados indicados na Figura 6. Além disso, pode-se chegar à equação (7) devido à conservação de entropia (representada pela letra "S").

$$S_1 = S_2 \quad (7)$$

Após sair da turbina, o fluido será resfriado pelo condensador, ou seja, ocorrerá uma transformação sem geração de trabalho e com pressão constante vista na equação (8) e (9). Assim, vale lembrar que o calor do condensador será negativo, pois há uma liberação de calor nessa etapa.

$$\dot{Q}_L = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (8)$$

$$P_2 = P_3 \quad (9)$$

Em seguida, o fluido passa pela bomba e sofre uma transformação adiabática. Vale ressaltar que o valor do trabalho é negativo, pois a bomba gasta energia. Chega-se então nas equações (10) e (11).

$$\dot{W}_b = \dot{m}(h_4 - h_3) \quad (10)$$

$$S_3 = S_4 \quad (11)$$

E finalmente, o fluido é aquecido em uma transformação com pressão constante e sem realização de trabalho o que irá resultar no modelo matemático encontrado em (12) e (13).

$$\dot{Q}_H = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (12)$$

$$P_1 = P_4 \quad (13)$$

Por fim, o ciclo é reiniciado novamente. A partir desse momento encontra-se a eficiência do sistema e o *backworkratio* definidos nas equações (14) e (15).

$$\text{eficiência} = \eta = \frac{(\dot{W}_T - \dot{W}_b)}{\dot{Q}_H} \quad (14)$$

$$\text{backworkratio} = BWR = \frac{\dot{W}_b}{\dot{W}_T} \quad (15)$$

A Figura 7 representa o diagrama da temperatura vs. entropia da água indicando o processo do ciclo de Rankine.

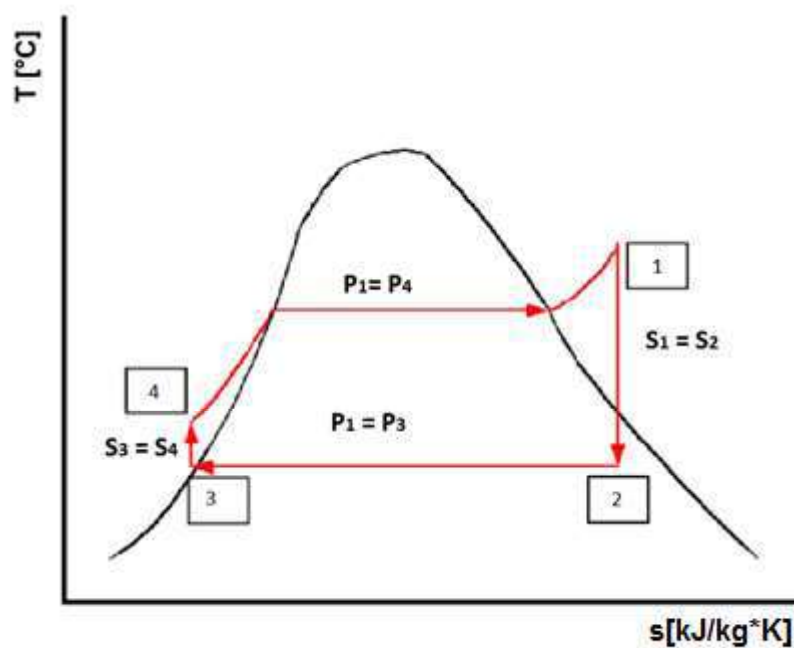


Figura 7: Relação de temperatura pela entropia da água, com pontos demarcando o ciclo de Rankine [7].

Assim, nota-se que através do ciclo de Rankine é possível converter energia térmica do sistema em energia elétrica.

Capítulo 4

Modelo Matemático da planta geotérmica estudada

Para a realização da simulação do modelo matemático, optou-se em utilizar o software LABVIEW uma vez que a linguagem G é fácil e compacta possibilitando rápidas alterações nas estruturas de controle caso sejam necessitadas.

Além disso, o software Engineering Equation Solver calculará os dados de entalpia para que seja possível, através da modelagem no LabView do ciclo de Rankine encontrar a potência da turbina que produzirá energia.

Após a análise do ciclo de Rankine simples, é abordado o ciclo binário da máquina geotérmica escolhida e simulada, além disso, será explicado cada comportamento termodinâmico da Figura 8.

De acordo com o que foi mencionado anteriormente, o tipo mais utilizado de energia geotérmica e que será alvo de estudo nesse projeto é aquela que utiliza o ciclo binário. Tal ciclo caracteriza-se por ser aplicado em lugares com média entalpia (temperaturas do geofluido entre 100 e 150°C). O mesmo consiste na utilização de um fluido secundário (geralmente N-Pentano ou Isopentano) de baixo ponto de ebulição e que deverá ser aquecido pelo geofluido no ciclo de Rankine Orgânico. O termo “orgânico” vem do fato de ser utilizado um fluido orgânico ao invés da água no processo.

Finalmente, será usado um sistema de controle que possa ser transmitido via dispositivo DAQ e assim emular um motor assíncrono para simular a turbina do sistema geotérmico.

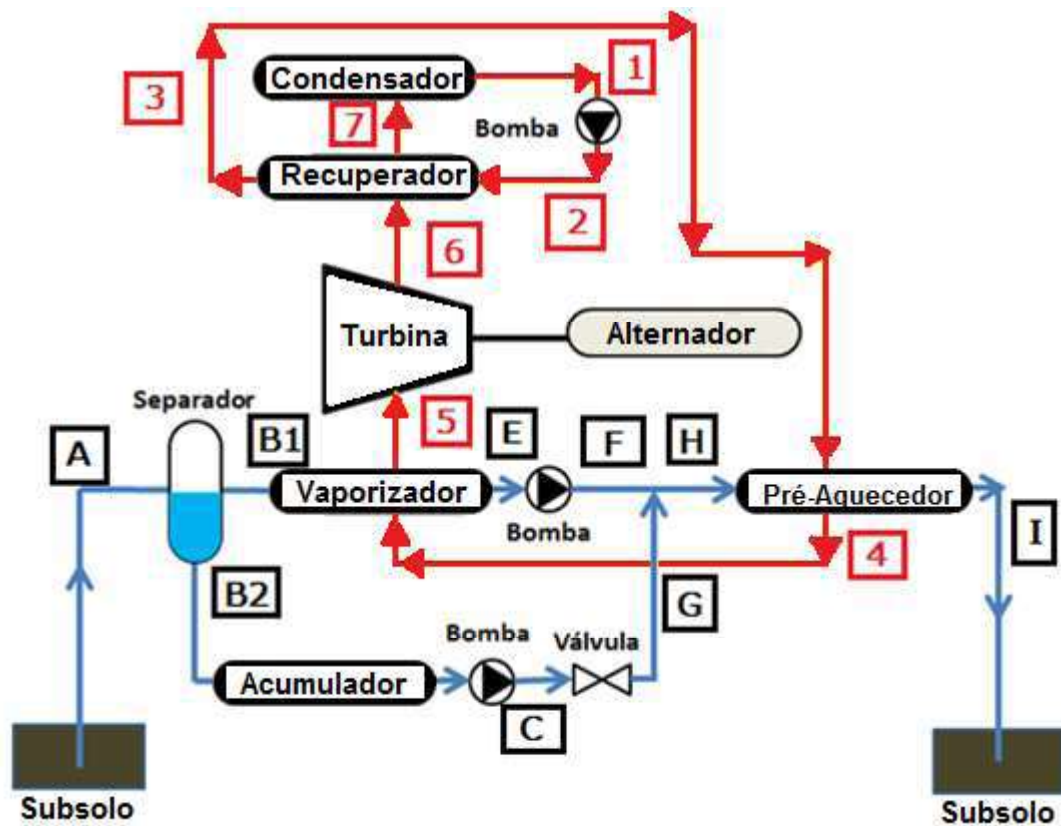


Figura 8: Máquina Geotérmica com ciclo binário que será simulada.

4.1 Componentes do sistema

Nos tópicos 4.1.1 e 4.1.2 é descrito a função de cada componente do sistema da Figura 8.

4.1.1 Circulação do Geofluido

Passagem do Estado A para B1 - Separador de líquido: tem como principal função separar a parte líquida do vapor para que não ocorra o retorno da mesma nas tubulações, evitando danos a planta geotérmica [8].

Passagem do Estado B2 para C - Acumulador e bomba do acumulador: utiliza-se de sua pressão para armazenar energia e alimentar a sua bomba principal [9].

Passagem do Estado C para G - Válvula: ajuda a reduzir a pressão do fluido, mantendo a temperatura e a entalpia constantes [10].

Passagem do Estado E para F - Bomba de condensação: recebe a água líquida condensada do vapor geotérmico, assim, a bomba é encarregada de injetar o líquido geotérmico de volta no interior da Terra.

Passagem do Estado H para I - Pré-aquecedor: antes de retornar à Terra, há o pré aquecimento do fluido binário através da troca de calor com o fluido geotérmico na fase líquida e com baixa entalpia.

Passagem do Estado B1 para E - Vaporizador: faz a troca de calor entre o fluido geotérmico e o fluido binário.

4.1.2 Circulação do Fluido Binário

- Turbina a vapor: máquina térmica com a função de converter a energia da entalpia contida no vapor em energia mecânica.

- Alternador: gerador síncrono que converte a energia mecânica em elétrica.

- Recuperador: recebe o calor remanescente do vapor que circulou pela turbina (passagem de 6 para 7), assim aquece o fluido (passagem de 2 para 3) que circulou pelo condensador. Isso ocorre, de forma a reduzir a entalpia no ponto 7 para que o fluido seja facilmente condensado para ser escoado na bomba e repetir o processo como um todo.

- Condensador: função de resfriar o fluido de trabalho da fase de vapor para o estado líquido.

- Bomba de Ciclo: bombear o fluido de trabalho a fim de reiniciar o ciclo.

4.2 Interpolação Termodinâmica

Nos estudos de parâmetros termodinâmicos, é necessário levar em consideração a não linearização dos dados e também, nenhum tipo de padrão adotado para modelagem de ciclos: há vários valores tabelados contendo pressão, temperatura, entalpia e entropia do fluido.

Assim, se apenas dois parâmetros de um estado termodinâmico é conhecido, pode-se encontrar os outros a partir dos dados tabelados. No entanto, caso os valores conhecidos não se encontrarem entre as informações tabeladas, o procedimento usual é interpolá-los de forma a se poder utilizá-los de acordo com o procedimento padrão.

A Figura 9 exemplifica a interpolação, ou seja, são conhecidos os valores do ponto "Q" e do ponto "P", assim, é possível definir os valores entre esses pontos [11].

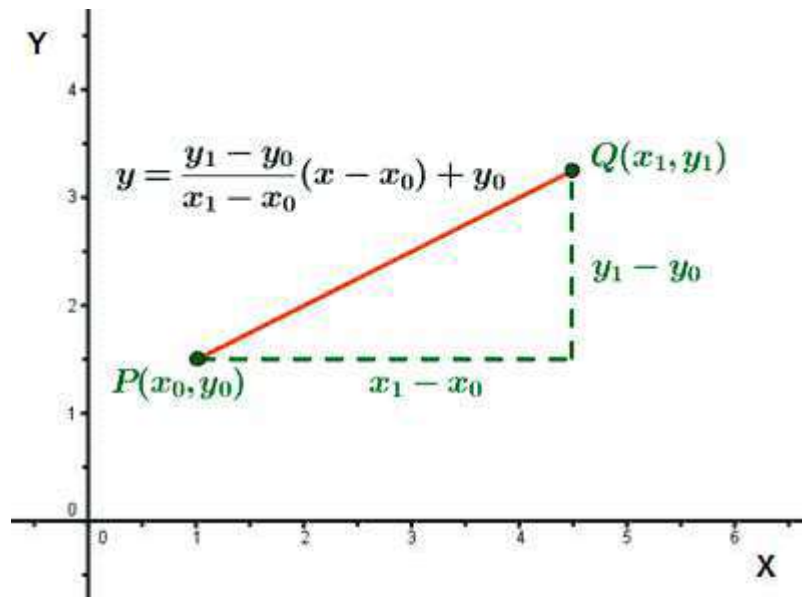


Figura 9: descrição do processo de interpolação [12].

Finalmente, em relação ao projeto, foram criados vetores de cada parâmetro termodinâmico a partir do software “EES” com uma taxa de aquisição específica entre cada amostra. Em seguida, foi desenvolvida uma função no LABVIEW em que definidos dois valores de entrada, é possível encontrar os parâmetros a partir da referência dos valores dos vetores de cada amostras e uma interpolação entre os intervalos mais próximos.

Abaixo, encontra-se a descrição e o balanço energético entre os diferentes pontos da máquina geotérmica.

4.3 Transformações sofridas pelo fluido geotérmico

Estado (A)

Nesse estado, a temperatura do fluido geotérmico das simulações poderá variar entre 100 °C a 151,8 °C, pois é a faixa de temperatura do fluido na qual é possível implementar o ciclo binário. Além disso, será adotado que o fluido geotérmico é bifásico na entrada com título de 0,2. Sendo “Título” a quantidade de vapor presente na mistura (Título unitário: vapor saturado e Título nulo: líquido saturado).

Parâmetros:

T_A : valor de entrada da simulação;

x_A : valor de 0,2 na simulação;

\dot{m}_A : valor de 100 kg/s na simulação;

P_A : encontrado pela interpolação;

s_A : encontrado pela interpolação;

h_A : encontrado pela interpolação.

Sendo os parâmetros temperatura, título, fluxo, pressão, entropia e entalpia nesse estado, respectivamente.

Transformação de (A) para (B1)

O fluido no estado B1 está em estado de vapor saturado após passar pelo separador (Título unitário).

Enquanto que os parâmetros:

$$\dot{m}_{B1}, T_{B1}, P_{B1}, h_{B1}, s_{B1}, \dot{m}_{GNC}$$

Representam o fluxo, temperatura, pressão, entalpia e entropia nesse estado e fluxo dos gases não condensáveis que são misturados com vapor. Além disso, a relação apresentada em (16) deve ser satisfeita:

$$\dot{m}_{B1} + \dot{m}_{GNC} = \dot{m}_A \times x_A \quad (16)$$

Dessa forma, estima-se apenas uma pequena parcela de gases não condensáveis (aproximadamente 2% do fluxo total) observados nas equações de (17) a (20).

$$\dot{m}_{GNC} = \dot{m}_A \times x_A \times 0,02 \quad (17)$$

$$\dot{m}_{B1} = \dot{m}_A \times x_A \times 0,98 \quad (18)$$

$$P_{B1} = P_A \quad (19)$$

$$T_{B1} = T_A \quad (20)$$

A partir desses resultados, é possível encontrar a entropia e entalpia de acordo com a interpolação.

Transformação de (B1) para (E)

O fluido entra como vapor saturado, transforma-se para o estado de líquido e sub-resfriado devido à troca de calor no vaporizador (transformação com pressão constante).

Parâmetros:

$$\dot{m}_E, T_E, P_E, h_E, s_E$$

Ou seja, esses parâmetros representam o fluxo, a temperatura, a pressão, a entalpia e a entropia, respectivamente.

De acordo com a projeção dos valores estabelecidos da central geotérmica do “Pico Vermelho” [3], têm-se as relações de (21) a (24).

$$T_E = T_B \times 0,93 \quad (21)$$

$$P_E = P_B \quad (22)$$

$$\dot{m}_E = \dot{m}_B \times 0,988 \quad (23)$$

$$\dot{m}_{Escape} = \dot{m}_B \times 0,012 \quad (24)$$

Novamente, para se determinar a entropia e entalpia é necessário utilizar a ferramenta de interpolação conforme vem sendo mencionado nesse trabalho.

Transformação de (E) para (F)

O fluido passa pela bomba de condensação, aumentando assim sua pressão. Além disso, a transformação é adiabática e sofre trabalho para ser realizada.

Parâmetros:

$$\dot{m}_F, T_F, P_F, h_F, S_F$$

Da mesma forma que nos procedimentos anteriores, é definido o fluxo, a temperatura, a pressão, a entalpia e a entropia.

De acordo com a projeção dos valores estabelecidos através da central geotérmica do “Pico Vermelho”, as relações de (25) a (30) são encontradas:

$$P_F = 1,18 \times P_E \quad (25)$$

$$\dot{m}_F = \dot{m}_E \quad (26)$$

$$\dot{W}_{Bomba\ do\ Condensador} = \dot{m}_E \times (h_F - h_E) \quad (27)$$

$$h_F = \frac{\dot{W}_{Bomba\ do\ Condensador}}{\dot{m}_E} + h_E \quad (28)$$

$$S_F = S_E \quad (29)$$

$$T_F = T_E + 0,01 \quad (30)$$

Transformação de (A) para (B2)

No ponto B2 o fluido encontra-se no estado líquido, pois a mistura bifásica foi separada pelo separador. Assim a pressão manteve-se constante e o valor da energia de entalpia é aquela que se refere ao de líquido saturado.

Parâmetros nesse estado:

$$P_{B2}, S_{B2}, h_{B2}$$

Assim, o fluxo, a temperatura e a entalpia nas quais se encontra a relação (30):

$$P_{B2} = P_A \quad (31)$$

s_{B2} : entropia do líquido saturado (Título igual a zero)

h_{B2} : entalpia do líquido saturado (Título igual a zero)

Transformação de (B2) para (C)

Ao sair da bomba do acumulador, o fluido aumenta sua pressão transformando-se em líquido sub-arrefecido. Além disso, a transformação é adiabática e sofre a trabalho.

Parâmetros:

$$\dot{m}_C, T_C, P_C, h_C, s_C$$

Representam o fluxo, a temperatura, a pressão, a entalpia e a entropia, respectivamente.

Assim, de acordo com a projeção dos valores estabelecidos a partir da central geotérmica do “Pico Vermelho”, as relações (32), (33) e (34) são satisfeitas:

$$T_C = T_{B2} \times 1,063 \quad (32)$$

$$P_C = P_{B2} \times 1,28 \quad (33)$$

h_C : encontrado pela interpolação

s_C : encontrado pela interpolação

$$\dot{m}_C = (1 - x_A) \times \dot{m}_A \quad (34)$$

Transformação de (C) para (G)

O fluido passa por uma válvula redutora de pressão, assim, sua entalpia e entropia permanecem constantes. Além disso, seu estado altera-se para uma mistura bifásica.

Parâmetros:

$$\dot{m}_G, T_G, P_G, h_G, s_G$$

Sendo respectivamente: o fluxo, a temperatura, a pressão, a entalpia e a entropia. De acordo com a projeção dos valores estabelecidos da central geotérmica do “Pico Vermelho”, as relações (35) a (39) precisam ser satisfeitas:

$$\dot{m}_G = \dot{m}_C \quad (35)$$

$$P_G = P_C \times 0,92 \quad (36)$$

$$h_G = h_C \quad (37)$$

$$s_G = s_C \quad (38)$$

$$T_G = T_C \times 1,019 \quad (39)$$

Transformação de (F) e (G) para (H)

Neste ponto, o fluido geotermico do estado (F) e (G) é transformado para o estado (H). Neste ponto o fluido encontra-se em um estado de líquido sub-resfriado.

Parâmetros:

$$\dot{m}_H, T_H, P_H, h_H, s_H$$

Nesse caso, os parâmetros de interesse são respectivamente: o fluxo, a temperatura, a pressão, a entalpia e a entropia. De acordo com a projeção dos valores estabelecidos da central geotérmica do “Pico Vermelho”, é possível determinar as relações de (40) a (43) relações:

$$\dot{m}_H = \dot{m}_F + \dot{m}_G \quad (40)$$

$$P_H = P_G \quad (41)$$

$$T_H = 1,002 \times T_G \quad (42)$$

s_H : encontrado pela interpolação

$$h_H = \frac{\dot{m}_F \times h_F + \dot{m}_G \times h_G}{\dot{m}_H} \quad (43)$$

Transformação de (H) para (I)

Ao passar pelo pré-aquecedor, o fluido perde temperatura e cede calor ao fluido secundário. Assim, há a realização de trabalho, numa transformação com pressão constante.

Parâmetros nesse estado:

$$\dot{m}_I, T_I, P_I, h_I, s_I$$

Nesse, novo ponto de operação o fluxo, a temperatura, a pressão, a entalpia e a entropia. De acordo com a projeção dos valores estabelecidos da central geotérmica do “Pico Vermelho”, é encontrado como resultado as relações de (44) a (46).

$$P_I = P_H \quad (44)$$

$$T_I = T_A \times 0,57 \quad (45)$$

$$\dot{m}_I = \dot{m}_H \quad (46)$$

h_I : encontrado a partir da interpolação

s_I : encontrado a partir da interpolação

E finalmente, no estado (I), o geofluido retorna ao interior da Terra.

4.4 Transformações sofridas pelo fluido secundário

Em razão de apresentar baixa ebulição, o fluido escolhido foi o n-pentano. Por ser um sistema fechado, o fluxo do fluido binário não irá se alterar, será sempre o valor escolhido na entrada. Portanto, em todos os estado o fluxo será denominado como:

$\dot{m}_{n-pentano}$.

Estado (2)

O fluido adotado no projeto será o n-pentano por apresentar baixa ebulição a grandes valores de entalpia. Além disso, para efeitos de testes do motor assíncrono, será considerado uma faixa de pressão de 1000 a 1500 kPa, dependendo do que se deseja na entrada do sistema binário para efeitos de simulação.

Parâmetros nesse estado:

P_2 : parâmetro de entrada

T_2 : encontrado por interpolação

h_2 : encontrado por interpolação

s_2 : encontrado por interpolação

Nesse caso de análise, os parâmetros utilizados são a pressão, a temperatura, a entalpia e a entropia.

Transformação de (1) para (2)

Na passagem pela bomba, o fluido binário aumenta a sua pressão, a entalpia e a entropia. Ele entra em um estado chamado de líquido sub-resfriado e continua nesse estado na saída da bomba. Além disso, a entalpia no estado pode ser encontrada a partir de (47).

Parâmetros:

$$h_1 = \frac{\dot{W}_{Bomba\ de\ ciclo}}{\dot{m}_{n-pentano}} - h_2 \quad (47)$$

T_2 : encontrado por interpolação

P_2 : encontrado por interpolação

s_2 : encontrado por interpolação

Transformação de (2) para (3)

Ao passar pelo recuperador, o fluido secundário recebe calor do próprio fluido que está em outro estado, aumentando assim a sua entalpia, a temperatura e a entropia. Mesmo assim, seu estado continua como líquido sub-resfriado e a equação (48) indica que as pressões permanecem constantes.

$$P_3 = P_2 \quad (48)$$

T_3 : encontrado por interpolação

h_3 : encontrado por interpolação

s_3 : encontrado por interpolação

Transformação de (3) para (4)

O fluido geotérmico fornece calor para o fluido binário ao circular pelo pré-aquecedor. Mesmo assim, seu estado continua como sub-resfriado. A equação (49) define a entalpia no estado 4 enquanto que a (50) indica que as pressões permanecem constantes.

Parâmetros:

$$h_4 = h_3 - \frac{\dot{m}_H \times (h_I - h_H)}{\dot{m}_{n-pentano}} \quad (49)$$

$$P_4 = P_3 \quad (50)$$

T_4 : encontrado por interpolação

s_4 : encontrado por interpolação

Transformação de (4) para (5)

O fluido binário passa para o estado de vapor sobre-aquecido ao receber calor do fluido geotérmico através do vaporizador. A entalpia é encontrada a partir da equação (51) e as pressões permanecem constantes em (52).

Parâmetros:

$$h_5 = h_4 + \frac{\dot{m}_B \times h_B - (\dot{m}_{escape} \times h_{escape} + \dot{m}_E \times h_E)}{\dot{m}_{n-pentano}} \quad (51)$$

$$P_5 = P_4 \quad (52)$$

T_5 : encontrado por interpolação

s_5 : encontrado por interpolação

Transformação de (5) para (6)

Em tal processo, o fluido n-pentano perde pressão e transforma parte de sua entalpia em energia mecânica, assim há uma redução da energia termodinâmica, enquanto que o fluido permanece em estado de vapor sobre-aquecido ao sair da turbina. A entalpia no estado 6 pode ser encontrada em (53) enquanto que as pressões permanecem constantes na equação (54).

$$h_6 = h_5 - \frac{\frac{W_{alternador}}{\eta}}{\dot{m}_{n-pentano}} \quad (53)$$

$$P_6 = P_1 \quad (54)$$

Transformação de (6) para (7)

Etapa em que o fluido circula pelo recuperador e fornece energia ao sistema. O fluido sai em estado de vapor sobre-aquecido e retorna ao estado 1. E a equação (55) indica que as pressões nos estados 1 e 7 são constantes enquanto que a (56) mostra o cálculo da entalpia 7.

$$P_7 = P_1 \quad (55)$$

$$h_7 = h_6 + h_2 - h_3 \quad (56)$$

4.5 Balanço Energético

A seguir, será avaliado o balanço de energia, o quanto de trabalho entra ($W < 0$) e sai ($W > 0$) do sistema e também a quantidade de calor ingressa ($Q > 0$) e que é liberada ($Q < 0$).

Em relação ao fluido geotérmico tem-se o balanço de energia na equação (57).

$$\dot{W}_{\text{geotérmico}} = \dot{W}_{\text{bomba de condensação}} + \dot{W}_{\text{bomba do acumulador}} < 0 \quad (57)$$

Tal valor é negativo devido ao fato do sistema realizar trabalho contra o meio externo, o qual pode ser analisado na Figura 11. Além disso, na Figura 10 é mostrado o sistema recebendo trabalho.

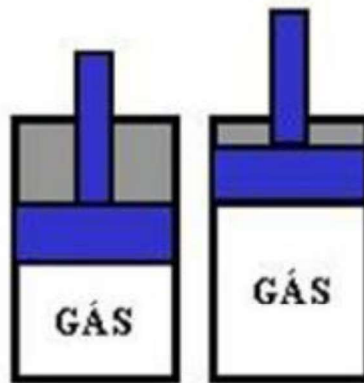


Figura 10: Gás sofrendo expansão – trabalho realizado pelo gás é positivo

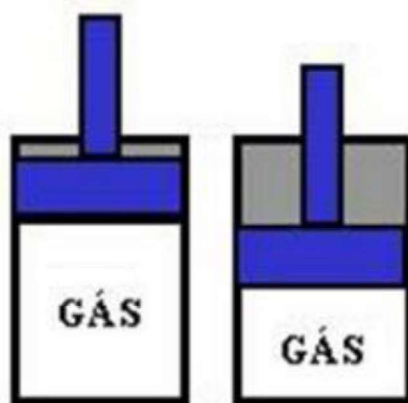


Figura 11: Gás sofrendo compressão – trabalho realizado pelo gás é negativo

Em relação ao fluido binário tem-se os balanços de calor nas equações de (57) a (63). Além disso, o balanço de energia está em (65) a (67) e a eficiência total em (68).

$$\dot{Q}_{recuperador (2 \rightarrow 3)} = \dot{m}_{n-pentano} \times (h_3 - h_2) > 0 \quad (58)$$

$$\dot{Q}_{pré-aquecedor (3 \rightarrow 4)} = \dot{m}_{n-pentano} \times (h_4 - h_3) > 0 \quad (59)$$

$$\dot{Q}_{vaporizador (4 \rightarrow 5)} = \dot{m}_{n-pentano} \times (h_5 - h_4) > 0 \quad (60)$$

$$\dot{Q}_{recuperador (6 \rightarrow 7)} = \dot{m}_{n-pentano} \times (h_6 - h_7) < 0 \quad (61)$$

$$\dot{Q}_{condensador (7 \rightarrow 1)} = \dot{m}_{n-pentano} \times (h_7 - h_1) < 0 \quad (62)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{fluidobinário_{entrada}} = \\ \dot{Q}_{recuperador (2 \rightarrow 3)} + \dot{Q}_{pré-aquecedor (3 \rightarrow 4)} + \dot{Q}_{vaporizador (4 \rightarrow 5)} \end{aligned} \quad (63)$$

$$\dot{Q}_{fluidobinário_{saída}} = \dot{Q}_{recuperador (6 \rightarrow 7)} + \dot{Q}_{condensador (7 \rightarrow 1)} \quad (64)$$

$$\dot{W}_{bomba\ de\ ciclo (1 \rightarrow 2)} = \dot{m}_{n-pentano} \times (h_2 - h_1) < 0 \quad (65)$$

$$\dot{W}_{turbina (5 \rightarrow 6)} = \dot{m}_{n-pentano} \times (h_5 - h_6) > 0 \quad (66)$$

$$\dot{W}_{fluidobinario} = \dot{W}_{bomba\ de\ ciclo (1 \rightarrow 2)} + \dot{W}_{turbina (5 \rightarrow 6)} \quad (67)$$

Eficiência total do sistema geotérmico:

$$\eta_{eficiência_{sistema\ geotérmico}} = \frac{\dot{W}_{fluidobinario} + \dot{W}_{geotérmico}}{\dot{Q}_{fluidobinário_{entrada}}} \quad (68)$$

Finalmente, o ciclo de Rankine geotérmico definido foi simulado no software LabView e seu "Front Panel" da simulação encontra-se em anexo. Próxima etapa consistirá em definir um controle do sistema geotérmico para a operação do motor de indução trifásico.

Capítulo 5

Procedimento para a Elaboração do Projeto

5.1 Controle do Sistema Geotérmico

Utilizou-se do mesmo princípio de controle de uma turbina a vapor de uma usina termelétrica. Tal método ocorre através do dispositivo chamado “atuador” de forma que mantenha constante a rotação do eixo da turbina. Assim, para variações de cargas elétricas ligadas ao gerador ou variação do fluxo do fluido geotérmico, o atuador deve agir para manter a rotação da turbina sempre constante [13].

Tal processo, visto também na Figura 12, ocorre através do seguinte método: válvulas de admissão são colocadas no eixo da turbina, assim caso ocorra um aumento de carga, a turbina reduz sua velocidade, portanto a válvula ajudaria a aumentar o fluxo do fluido para aumentar sua potência e compensar a redução da rotação. Em contrapartida, se houver uma redução de carga, o eixo aumentaria sua rotação e, portanto o fluxo é reduzido pelo atuador [14].

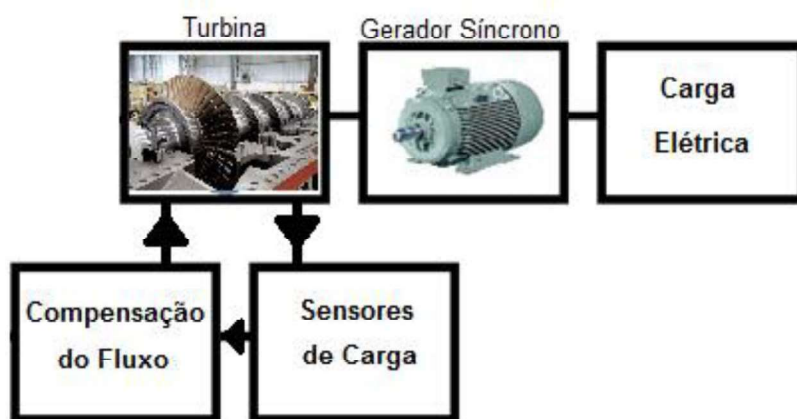


Figura 12: Malha de Controle descrevendo o funcionamento do governador [13].

Para o caso da simulação geotérmica, será utilizado um inversor CFW100 da marca WEG, este receberá um sinal analógico de tensão vindo do LabView que controlará a rotação da máquina de indução através de um controle vetorial sensorless já incluso nas operações de fábrica do inversor, assim haverá a estimação do torque de carga e conseqüentemente uma compensação da frequência para manter a rotação constante

(processo visto na Figura 13). Então se houver maiores cargas haverá uma compensação maior, caso haja poucas cargas, haverá uma compensação menor, portanto o controle feito pelo inversor agirá de maneira semelhante ao “governador” para controle de uma turbina a vapor.

Assim o controle do inversor trifásico funcionará como um governador pois manterá a rotação da máquina de indução trifásica constante, independente das cargas conectadas ao gerador síncrono. Tal controle utilizado será o “controle vetorial sensorless”, a qual será explicado na Figura 16.

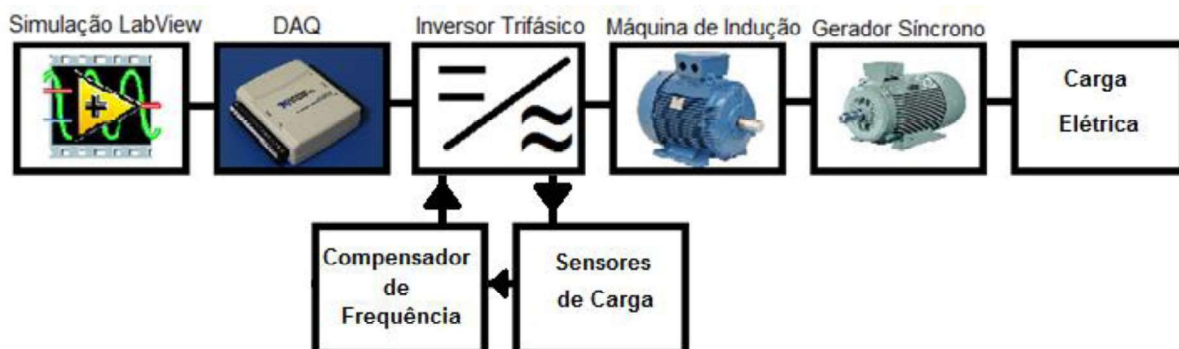


Figura 13: Malha de Controle descrevendo ação do inversor que é semelhante à operação do governador.

5.2 Inversor Trifásico da Marca WEG

O princípio de um inversor trifásico, visto na Figura 14 e 15, é de transformar tensão contínua em alternada. No caso do inversor utilizado, a alimentação é de 220Vrms de tensão monofásica vinda da rede elétrica, em seguida, tal tensão é retificada e a partir disso é transformada em tensão trifásica para alimentar o motor. A frequência de chaveamento dos transistores é definida por um sinal analógico vindo de um acoplamento conectado ao inversor, tal sinal varia de 0 a 5V, sendo que o valor mais baixo indica o repouso da máquina e o valor mais alto a velocidade nominal.

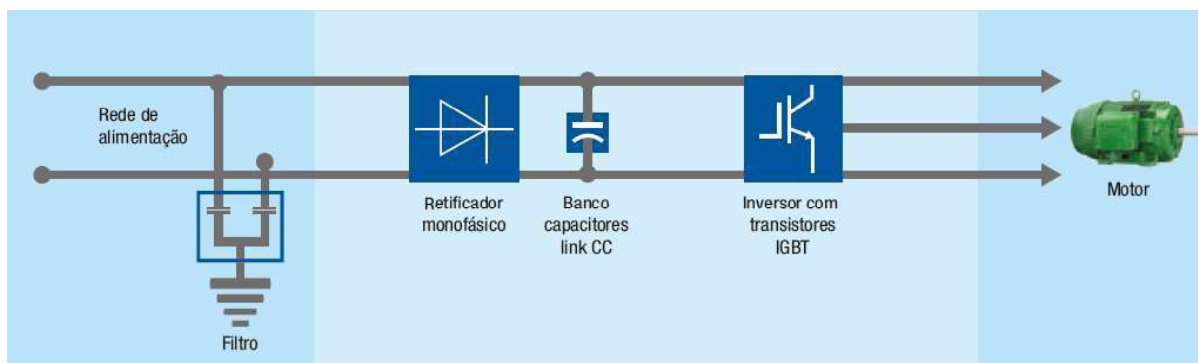


Figura 14: Princípio de operação do inversor CFW100 [22]



Figura 15: Inversor CFW100 junto com módulo de expansão para sinais analógicos

5.3 Interação entre DAQ e Máquina de Indução Trifásica

Para o controle da máquina de indução pretende-se utilizar o controle vetorial sensorless do inversor.

Primeiramente, o DAQ receberá do computador um sinal analógico de tensão proporcional à rotação do motor de indução proporcional à potência que seria produzida na máquina geotérmica. Em seguida, tal sinal será enviado para o acoplamento de sinais analógicos conectado ao inversor. Assim, o motor rotacionará com velocidade proporcional ao sinal analógico.

Para manter a rotação constante, independente da carga mecânica no motor, será utilizado o controle vetorial sensorless do inversor. Tal método é de alta performance através da estimação do torque e controle do fluxo magnético, pois considera as perdas, rendimento, escorregamento nominal e o fator de potência do motor. Através da medição da corrente de saída, o controle vetorial obtém instantaneamente o torque e o escorregamento

do motor. Caso haja a inserção de cargas na saída do gerador síncrono acoplado ao motor de indução, o controle vetorial irá atuar na compensação da tensão de saída e do escorregamento para manter a velocidade de rotação constante [21]. Assim, o controle vetorial em manter a rotação constante desempenhará função semelhante ao controle do fluxo de fluido de uma usina pelo governador.

5.4 Diagrama de Blocos: Controle Vetorial Sensorless

Na Figura 16 está o diagrama mostrando o controle vetorial realizado pelo inversor, em seguida, haverá uma explicação de cada bloco.

Regulação de tensão do Barramento CC – ajusta a tensão de barramento contínua que será posteriormente usada no chaveamento para tornar-se alternada;

Tempo de Aceleração/Desaceleração de Acionamento – tempo em que é gasto para acionar um motor do seu repouso até sua velocidade de rotação e o tempo em que é gasto para levá-lo ao seu repouso;

Limitador de Corrente – controla o limite de corrente do motor caso ultrapasse seu valor nominal (no caso da máquina de indução utilizada: 1,6A);

Valores Nominais do MIT – valores nominais de placa do motor de indução utilizado; nesse experimento, tem-se os seguintes valores da máquina escolhida na tabela 2.

Tabela 2: Valores Nominais da Máquina de indução

Potência Nominal (kW)	0,370
Velocidade Nominal (RPM)	1700
Frequência Nominal (Hz)	60
Eficiência Nominal (%)	71
Resistência Estática (Ohm)	6,19
Fator de Potência	0,63
Tensão de Linha do Estator (Vrms)	220
Corrente de Linha do Estator (Arms)	1,6
Número de Polos	4

Compensação de Frequência – calcula a frequência de saída (f_{esc}) em função do aumento da corrente ativa do motor;

Filtro - filtro para a compensação de escorregamento na frequência de saída;

Estimação do Torque – estimativa do torque de carga mecânica do motor de indução;

Controle de Fluxo – controle do fluxo apartir dos valores nominais do motor e da corrente de entrada do motor, resultanto no cálculo da tensão de compensação de saída

Modulação PWM – controle do PWM para definir o tempo de condução das chaves dos transistores do inversor;

Cálculo da Corrente do Inversor – corrente ativa da saída do inversor;

Calculo da Corrente do Motor – Encontra a corrente do motor para estimação do torque;

F_{ref} – frequência de referência para rotação do motor;

F_{rot} – frequência de rotação resultante entre a frequência de referência e a de compensação para manter a rotação do motor de indução constante.

6.1 Simulações no LabView

Os resultados do projeto serão avaliados através dos dados de saída fornecidos pela modelagem da máquina geotérmica. Assim, para que os valores sejam válidos e plausíveis, a obtenção dos parâmetros reais devem se assemelhar à aqueles simulados por software.

Nas simulações realizadas, o fluido binário que será utilizado será o n-pentano. O ciclo orgânico de rankine simples para um n-pentano segue a forma do gráfico da Figura 17 obtido pelo software EES..

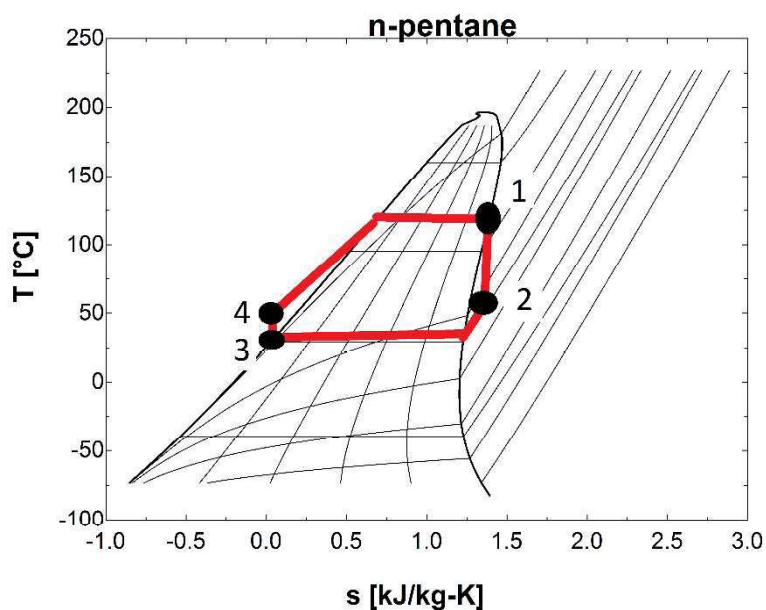


Figura 17: Diagrama Temperatura x Entropia do N-Pentano

Onde os pontos são indicado abaixo:

- 1- Fluido superaquecido – antes de passar pela turbina;
- 2- Fluido após passar pela turbina;
- 3- Fluido em estado líquido – após resfriamento do condensador;
- 4- Líquido comprimido - após ser bombeado.

6.2 Potência máxima produzida

Para o cálculo da potência máxima produzida, analisou-se a variação de temperatura do fluido geotérmico entre 100 e 150 °C (faixa de temperatura para o caso do ciclo binário) e a pressão do fluido binário (entre 1000 e 1500 kPa na saída da bomba do ciclo secundário). Assim, o fator limitante para escolha da potência máxima, foi a análise do fluido secundário para mantê-lo sempre em determinada fase, para que assim não haja danificação dos equipamentos como por exemplo a turbina térmica que deve receber apenas fluido na fase de vapor ou o condensador que recebe o fluido na fase líquida. Assim, a tabela 3 e 4 indica quais estados devem estar os fluidos em seus pontos de operação.

Tabela 3: estado de cada ponto de operação do fluido geotérmico

Estado	Estado do Fluido
A	Mistura Bifásica
B1	Vapor Saturado
B2	Líquido Subresfriado
C	Líquido Subresfriado
E	Líquido Subresfriado
F	Líquido Subresfriado
G	Mistura Bifásica
H	Líquido Subresfriado
I	Líquido Subresfriado

Tabela 4: estado de cada ponto de operação do fluido secundário

Estado	Fase
1	Líquido Subresfriado
2	Líquido Subresfriado
3	Líquido Subresfriado
4	Líquido Subresfriado
5	Vapor Sobreaquecido
6	Vapor Sobreaquecido
7	Vapor Sobreaquecido

Através das simulações nota-se na Figura 18 que para cada aumento de 100 kPa de pressão na saída da bomba do ciclo secundário a potência máxima disponível aumenta 0,5 MW. Assim, foi simulado os cenários variando-se apenas a pressão na saída da bomba e em seguida plotado seu diagrama T-s utilizando o software EES para mostrar o ciclo orgânico de Rankine para cada caso. Nota-se que no ponto 5 (entrada da turbina térmica) aumenta-se a temperatura e entropia com o aumento da pressão na saída da bomba e assim consequentemente também a entalpia, por isso, produz-se mais energia.

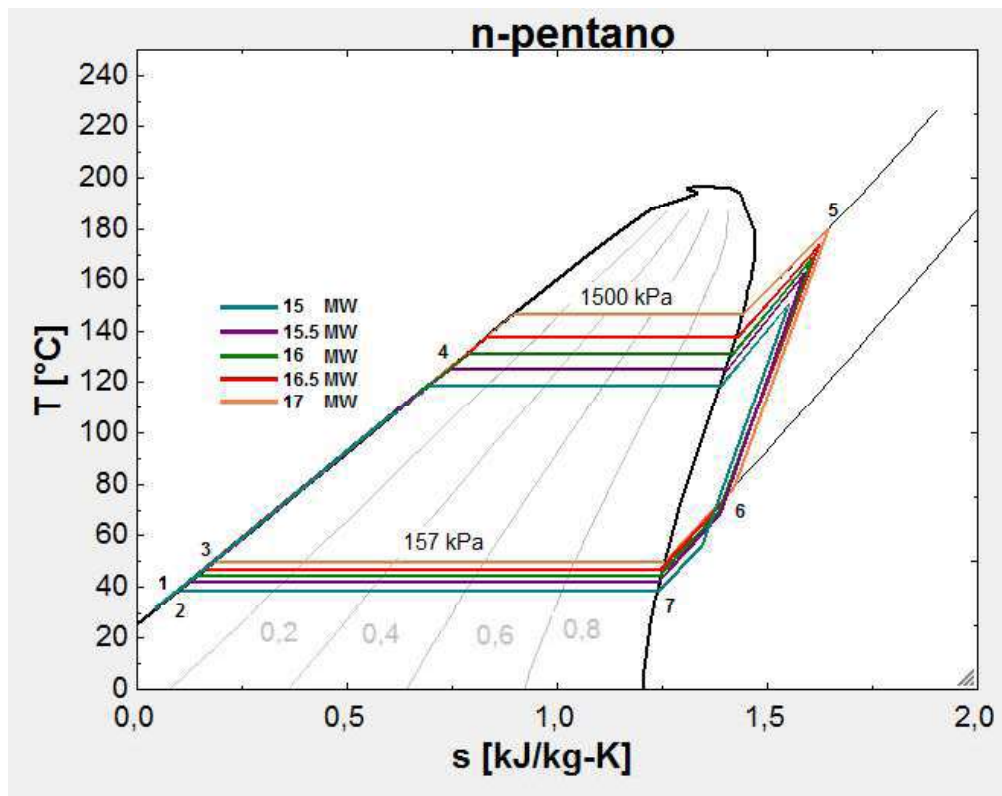


Figura 18: Diagrama T-s mostrando a influência na variação de pressão no ciclo de Rankine

Por outro lado, na Figura 19, para cada aumento de 13°C na temperatura da água geotérmica aumentou-se 2 MW na potência máxima. Assim, foi simulado os cenários variando-se apenas a temperatura geotérmica e em seguida plotado seu diagrama T-s utilizando o EES para mostrar o ciclo orgânico de Rankine para cada caso. Nota-se que no ponto 5 (entrada da turbina térmica) aumenta-se a temperatura e entropia com o aumento da temperatura na fonte geotérmica e assim consequentemente também a entalpia, por isso, produz-se mais energia.

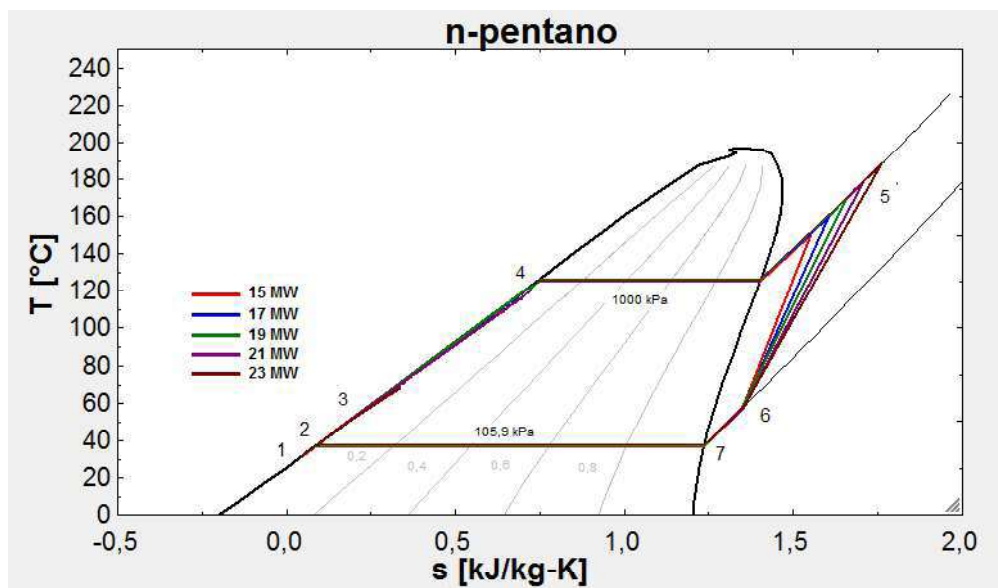


Figura 19: Diagrama T-s mostrando a influência na variação de temperatura da fonte geotérmica no ciclo de Rankine

A seguir, analisou-se alguns cenários das simulações realizadas.

6.2.1 Temperatura do Geofluido de 100°C e pressão de 1000 kPa na saída bomba do ciclo secundário

Na tabela 4 estão os valores obtidos para o caso da temperatura do Geofluido de 100°C e pressão de 1000 kPa. A partir desses valores, plotou-se o gráfico da Figura 20.

Tabela 5: Valores obtidos no ciclo binário através das simulações

Estado	P (kPa)	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg*K)
1	105,9	31,3	12,61	0,04382
2	1000	31,84	14,61	0,04556
3	1000	46,01	48,3	0,1535
4	1000	106,9	206	0,6048
5	1000	150,6	584	1,552
6	105,9	56,13	417,3	1,343
7	105,9	37,35	383,4	1,237

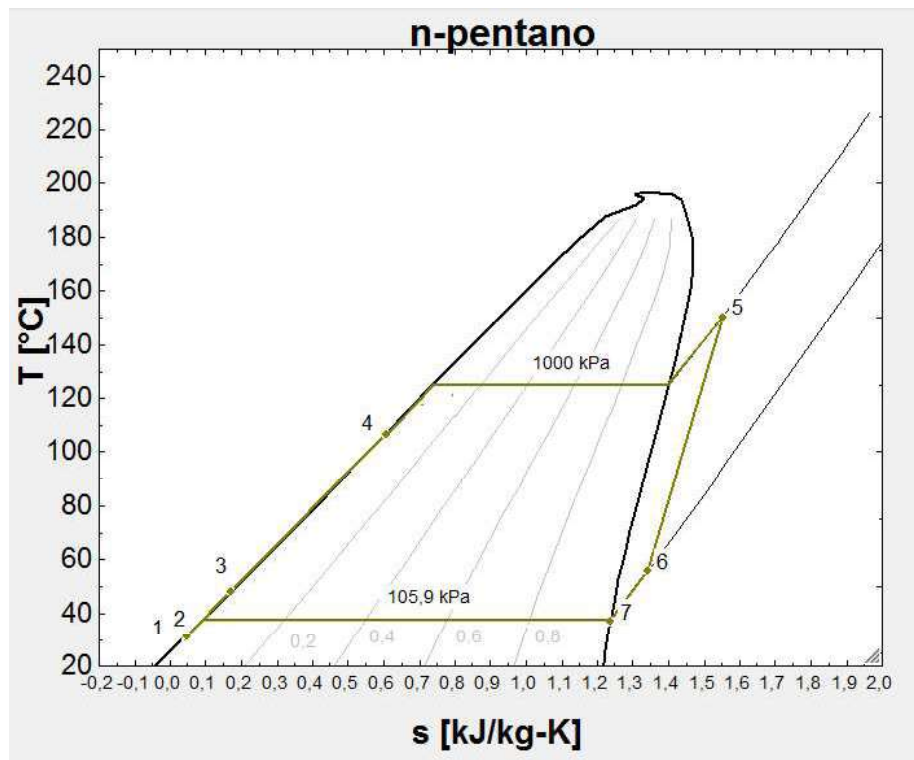


Figura 20: Ciclo de Rankine Orgânico para o caso do geofluido a 100°C e pressão de 1000 kPa na saída da bomba do ciclo secundário obtido pelo software EES

Para uma análise melhor da passagem dos pontos 1 e 2, ampliou-se o gráfico da Figura 20.

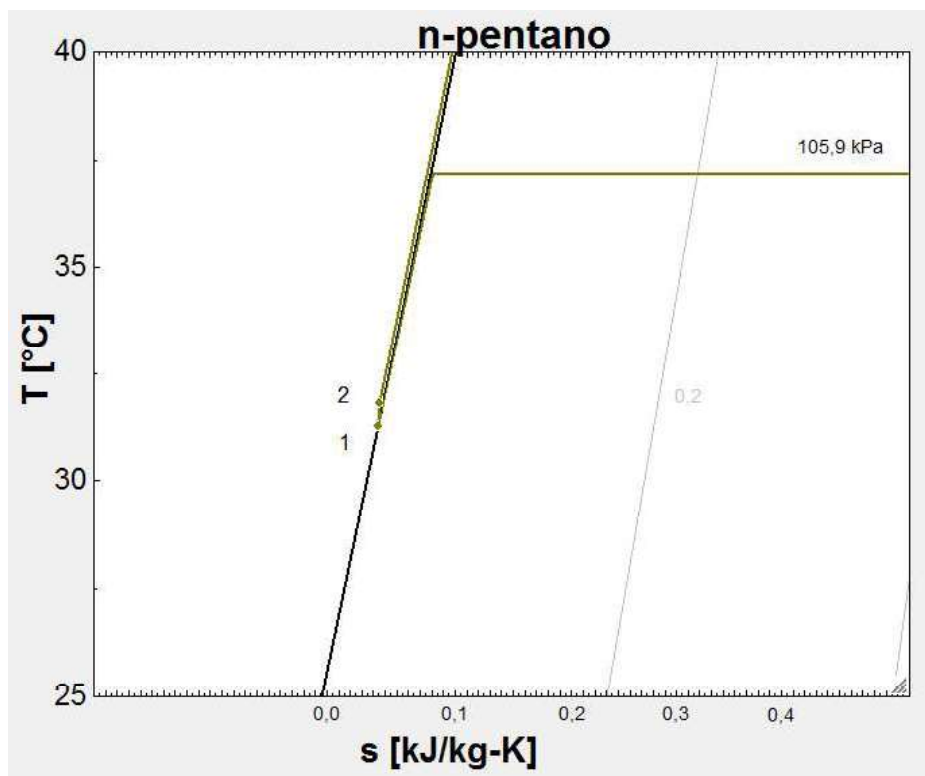


Figura 21: Diagrama T-s do gráfico da Figura 20 ampliado

Do estado 1 para o 2 nota-se que o fluido foi pressurizado pela bomba causando um aumento de sua pressão, entropia e temperatura de operação, mantendo-se no estado de líquido subresfriado.

Para este cenário, a maior potência disponível é de 15 MW nos terminais do gerador síncrono. O valor foi dado como máximo, pois acima desse valor, o estado no ponto 7 estaria numa mistura bifásica atrapalhando a operação do “recuperador” que opera com líquido sobreaquecido fornecendo calor ao líquido subresfriado do ponto 2. Além disso, a eficiência do sistema foi de 30,56%.

6.2.2 Temperatura do Geofluido de 151,8°C e pressão de 1000 kPa na saída bomba do ciclo secundário

Na tabela 6 estão os valores obtidos para o caso da temperatura do Geofluido de 151,8°C e pressão de 1000 kPa. A partir desses valores, plotou-se o gráfico da Figura 22.

Tabela 6: Valores obtidos no ciclo binário através das simulações

Estado	P (kPa)	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)
1	105,5	37,07	50,63	0,1667
2	1000	47,8	52,63	0,1671
3	1000	46,1	48,52	0,1542
4	1000	125	288	0,8137
5	1000	188,1	676,5	1,761
6	105,5	57,56	420	1,352
7	105,5	38,79	386	1,246

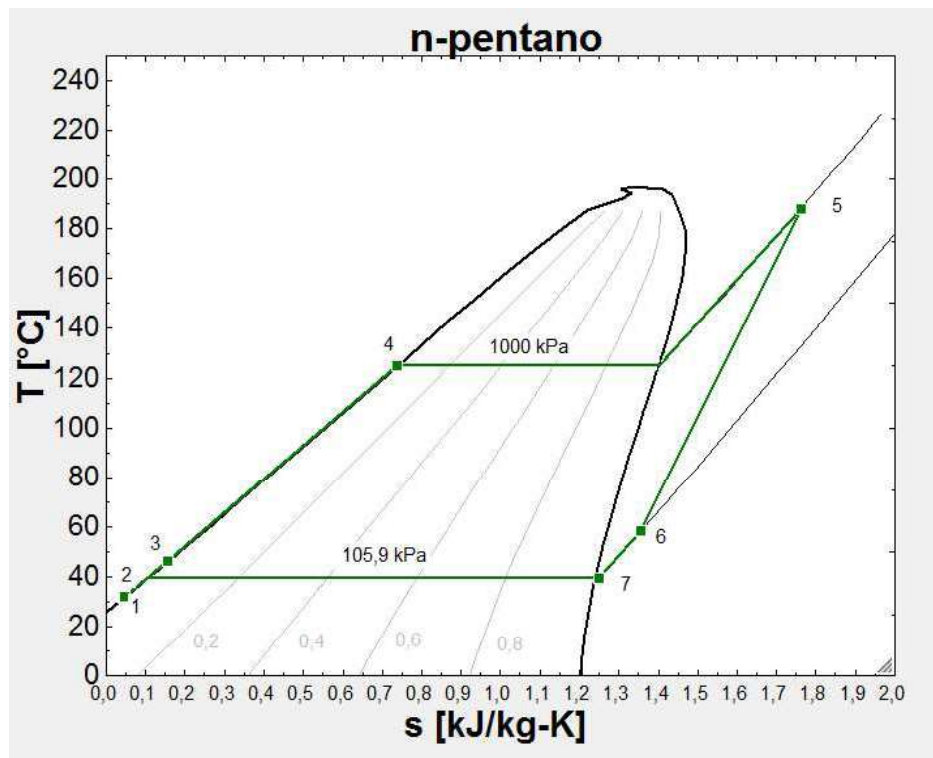


Figura 22: Ciclo de Rankine Orgânico para o caso do geofluido a 151,8°C e pressão de 1000 kPa na saída da bomba do ciclo secundário obtido pelo software EES

Para uma análise melhor da passagem dos pontos 1 e 2, ampliou-se o gráfico da Figura 22.

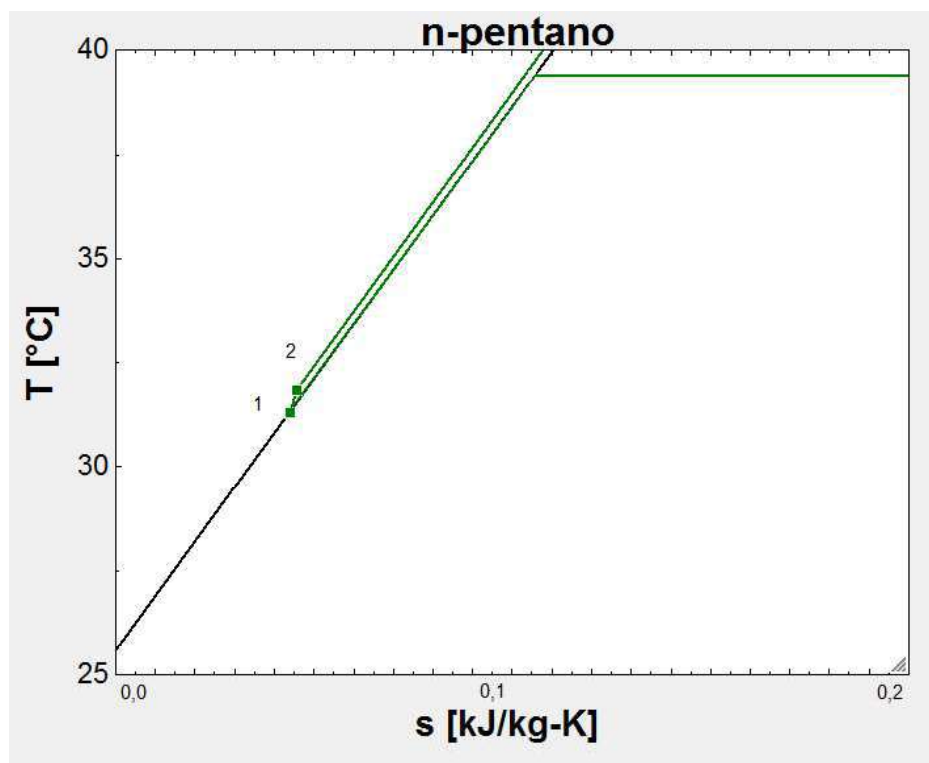


Figura 23: Diagrama T-s do gráfico da Figura 22 ampliado

Do estado 1 para o 2 nota-se que o fluido foi pressurizado pela bomba causando um aumento de sua pressão, entropia e temperatura de operação, mantendo-se no estado de líquido subresfriado.

Para este cenário, a maior potência disponível é de 23 MW nos terminais do gerador síncrono. Além disso, a eficiência do sistema foi de 40,22%.

6.2.3 Temperatura do Geofluido de 100°C e pressão de 1500 kPa na saída bomba do ciclo secundário

Na tabela 7 estão os valores obtidos para o caso da temperatura do Geofluido de 100°C e pressão de 1500 kPa. A partir desses valores, plotou-se o gráfico da Figura 24.

Tabela 7: Valores obtidos no ciclo binário através das simulações

Estado	P (kPa)	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg*K)
1	157	47,16	50,45	0,1647
2	1500	47,57	52,45	0,1639
3	1500	69,15	105,9	0,325
4	1500	126,8	263	0,7484
5	1500	179,7	641	1,644
6	157	78,77	458	1,419
7	157	50,83	405	1,262

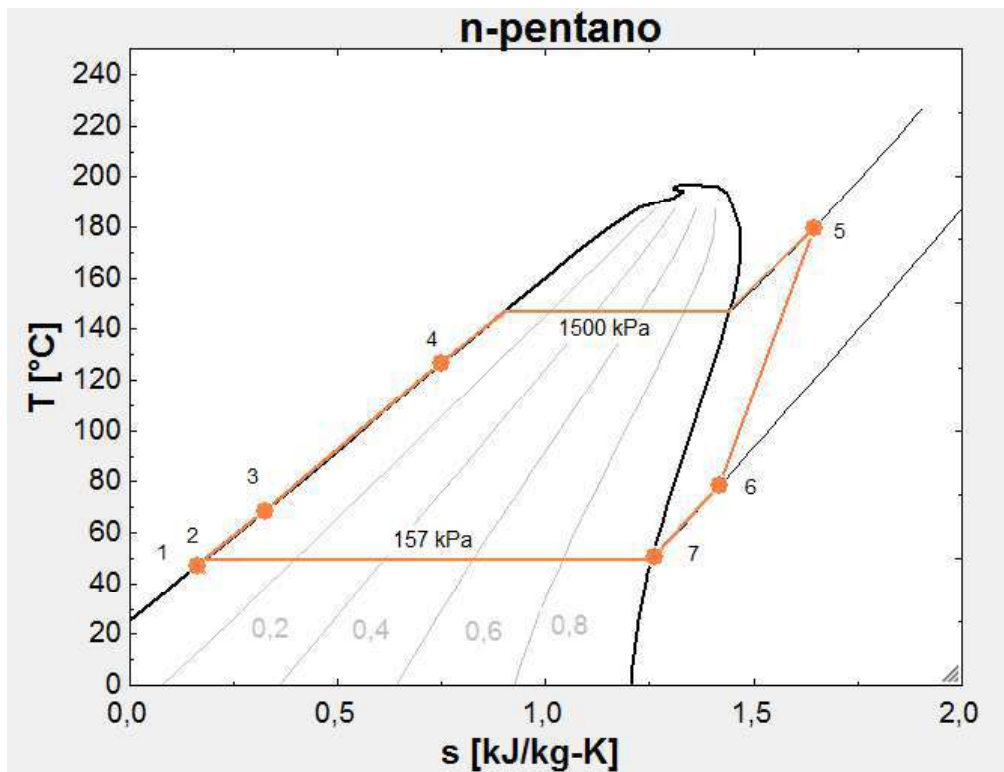


Figura 24: Ciclo de Rankine Orgânico para o caso do geofluido a 100°C e pressão de 1500 kPa na saída da bomba do ciclo secundário obtido pelo software EES

Para uma análise melhor da passagem dos pontos 1 e 2, ampliou-se o gráfico da Figura 24.

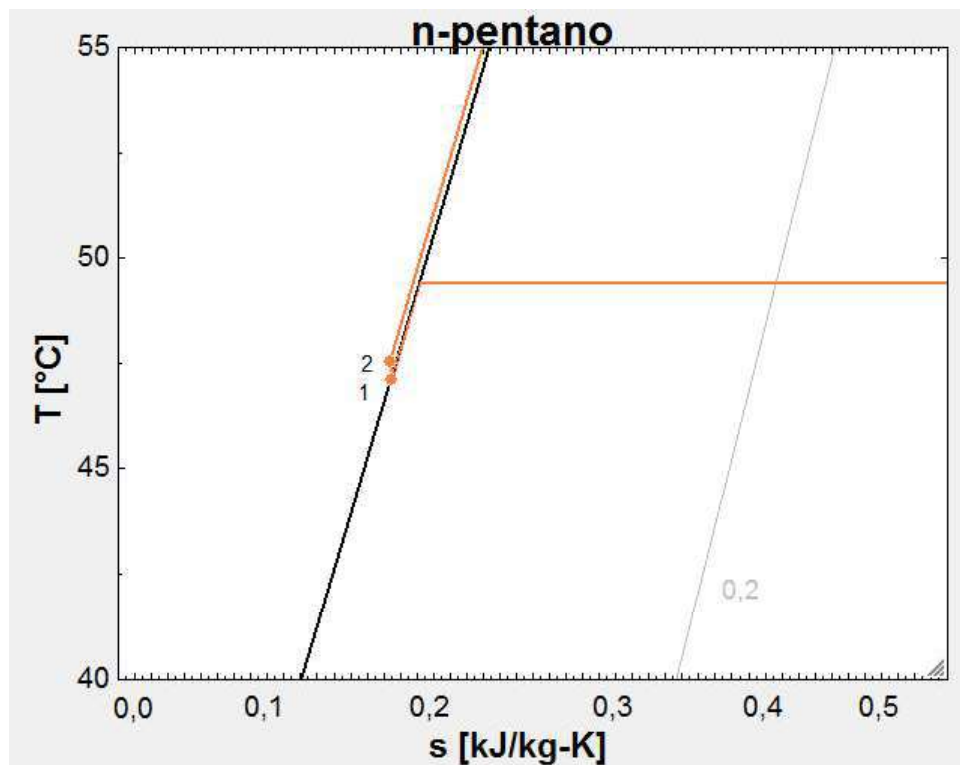


Figura 25: Diagrama T-s do gráfico da Figura 24 ampliado

Do estado 1 para o 2 nota-se que o fluido foi pressurizado pela bomba causando um aumento de sua pressão, entropia e temperatura de operação, mantendo-se no estado de líquido subresfriado.

Para este cenário, a maior potência disponível é de 17,5 MW nos terminais do gerador síncrono. Além disso, a eficiência do sistema foi de 35,75%.

6.2.4 Temperatura do Geofluido de 151,8°C e pressão de 1500 kPa na saída bomba do ciclo secundário

Na tabela 8 estão os valores obtidos para o caso da temperatura do Geofluido de 151,8°C e pressão de 1500 kPa. A partir desses valores, plotou-se o gráfico da Figura 26.

Tabela 8: Valores obtidos no ciclo binário através das simulações

Estado	P (kPa)	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg*K)
1	155	47,39	51,01	0,1665
2	1500	47,8	53,01	0,1656
3	1500	69,15	105,9	0,325
4	1500	146,7	345	0,9472
5	1500	214,6	733	1,839
6	155	74,86	450,5	1,399
7	155	49,01	397,5	1,241

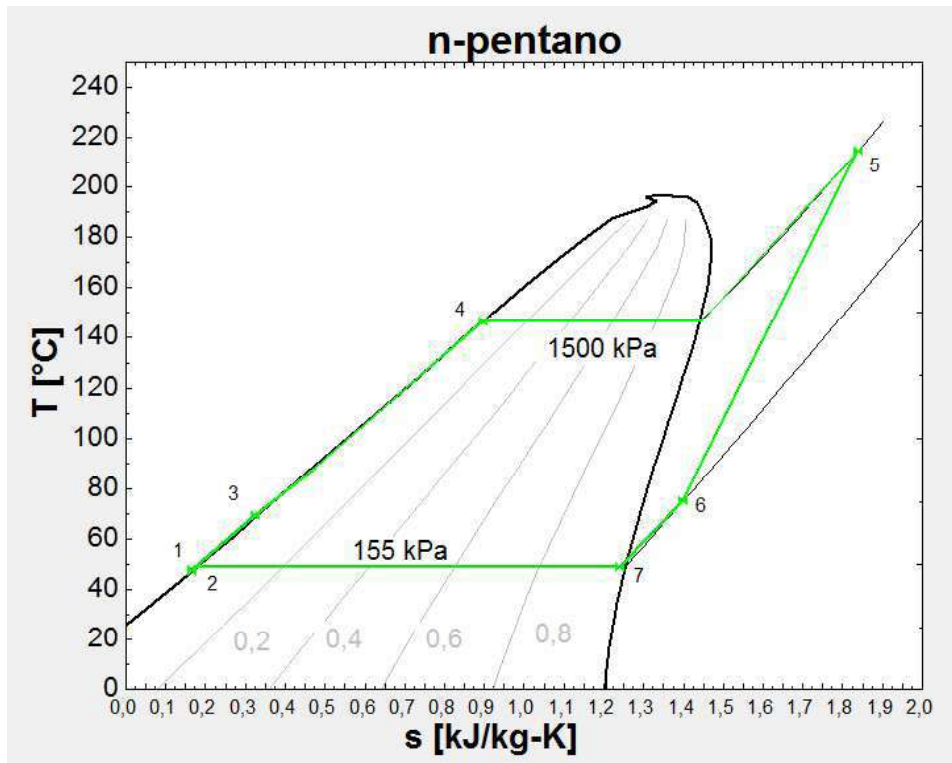


Figura 26: Ciclo de Rankine Orgânico para o caso do geofluido a 151,8°C e pressão de 1500 kPa na saída da bomba do ciclo secundário obtido pelo software EES

Para uma análise melhor da passagem dos pontos 1 e 2, ampliou-se o gráfico da Figura 26.

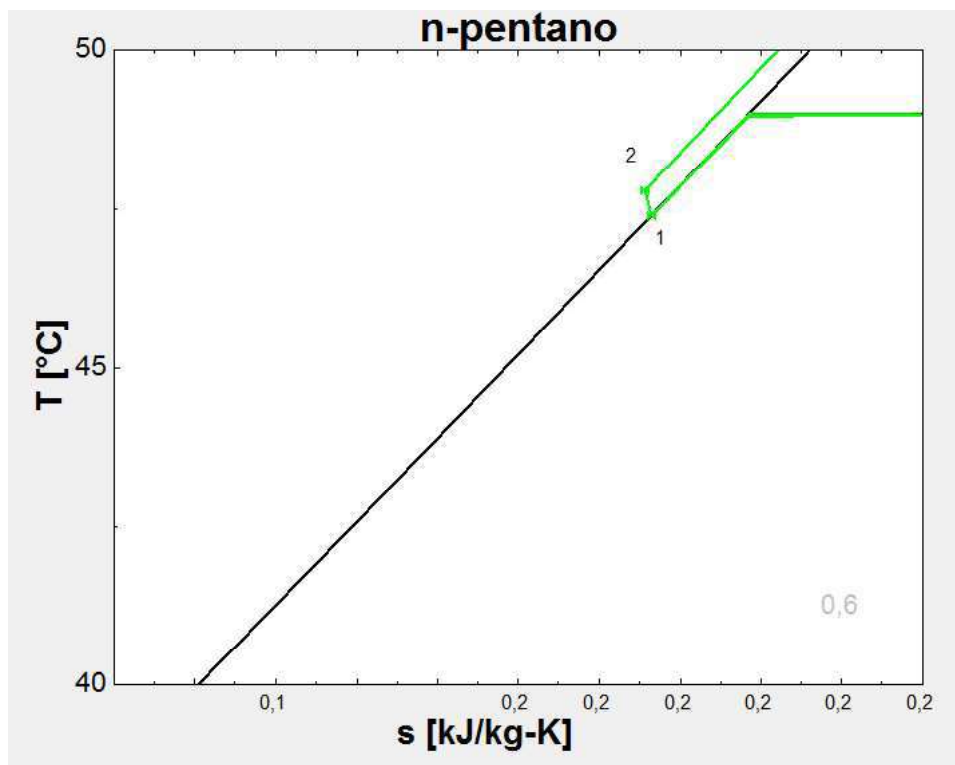


Figura 27: Diagrama T-s do gráfico da Figura 26 ampliado

Do estado 1 para o 2 nota-se que o fluido foi pressurizado pela bomba causando um aumento de sua pressão, entropia e temperatura de operação, mantendo-se no estado de líquido subresfriado.

Para este cenário, a maior potência disponível é de 25,5 MW nos terminais do gerador síncrono. Além disso, a eficiência do sistema foi de 44,64%.

6.2.5 Caso em que não ocorre produção de energia elétrica

O gráfico da Figura 28 mostra uma comparação para o caso em que a temperatura do geofluido é 100 °C e a pressão da saída da bomba no ciclo secundário é 1000 kPa. Primeiramente plotou-se o ciclo para a máxima potência produzida nesse caso (15 MW) em seguida plotou-se o ciclo para caso não haja produção de energia elétrica. Percebe-se assim que pontos 5 e 6 não tiveram uma significativa redução de temperatura, pois suas entalpias continuaram as mesmas.

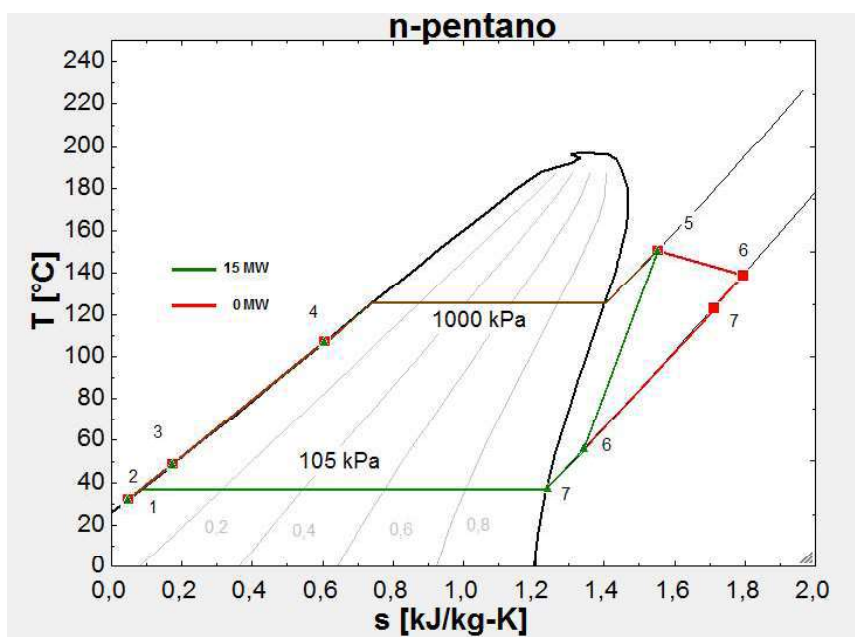


Figura 28: Ciclo de Orgânico de Rankine comparando uma potência máxima com uma potência nula obtido pelo software EES

6.3 Simulações de todo o sistema geotérmico em conjunto com o inversor

As Figuras 29 e 30 mostram o cenário realizado no laboratório para testes práticos e verificação da simulação do sistema geotérmico.

Utilizou-se de um gerador síncrono de 0,370 kW acoplado mecanicamente a um motor de indução de 0,370 kW com velocidade nominal de 1700 RPM.

Primeiramente, utilizou-se cargas resistivas como lâmpadas para verificação do sistema na saída do gerador síncrono.

Como a máquina geotérmica fornece a potência fornecida pelo sistema, tal valor pode não ser utilizado integralmente caso o gerador não opere a plena carga. Então para solucionar tal problema, utilizou-se de um potenciômetro trifásico para testes, assim, para verificação, adotou-se o seu fundo de escala como a máxima potência consumida do gerador síncrono e variou-se os parâmetros da simulação feita pelo LabView para verificação.

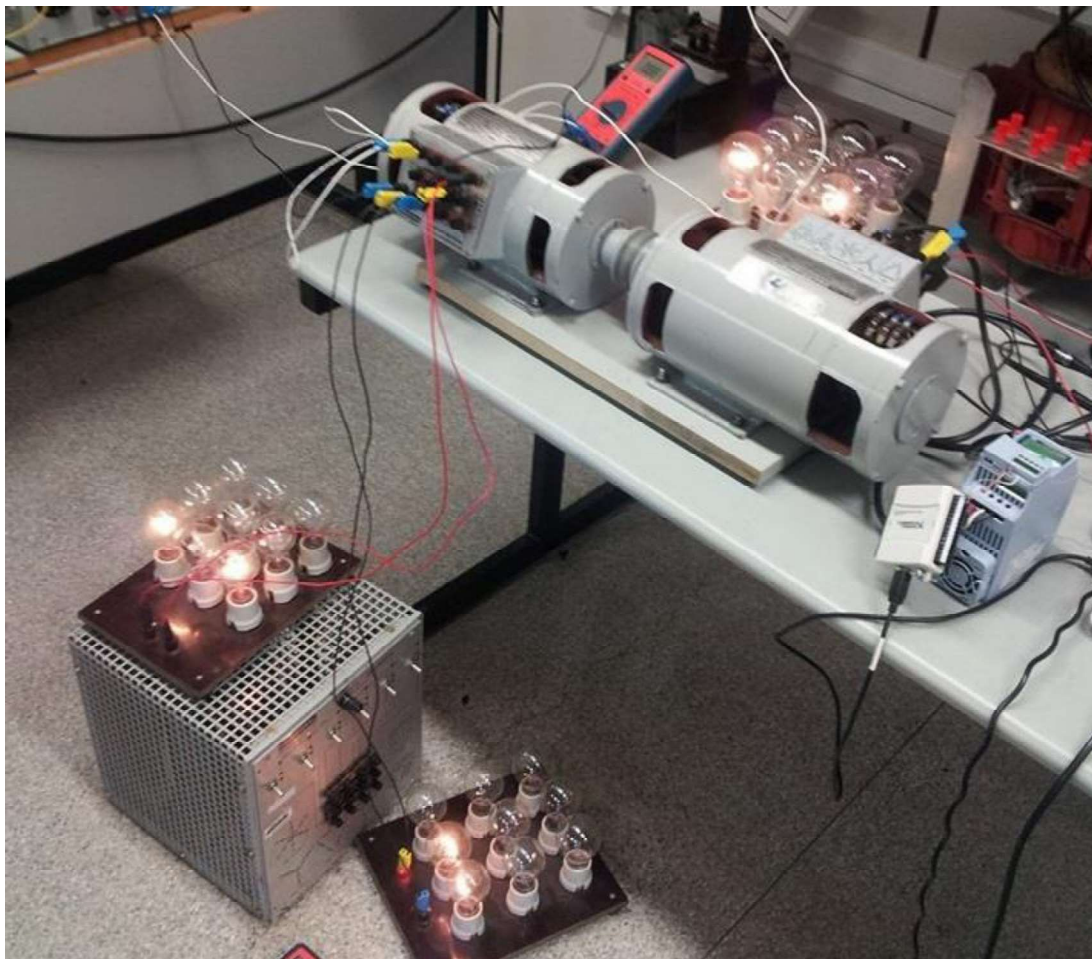


Figura 29: Testes experimentais utilizando-se de cargas resistivas

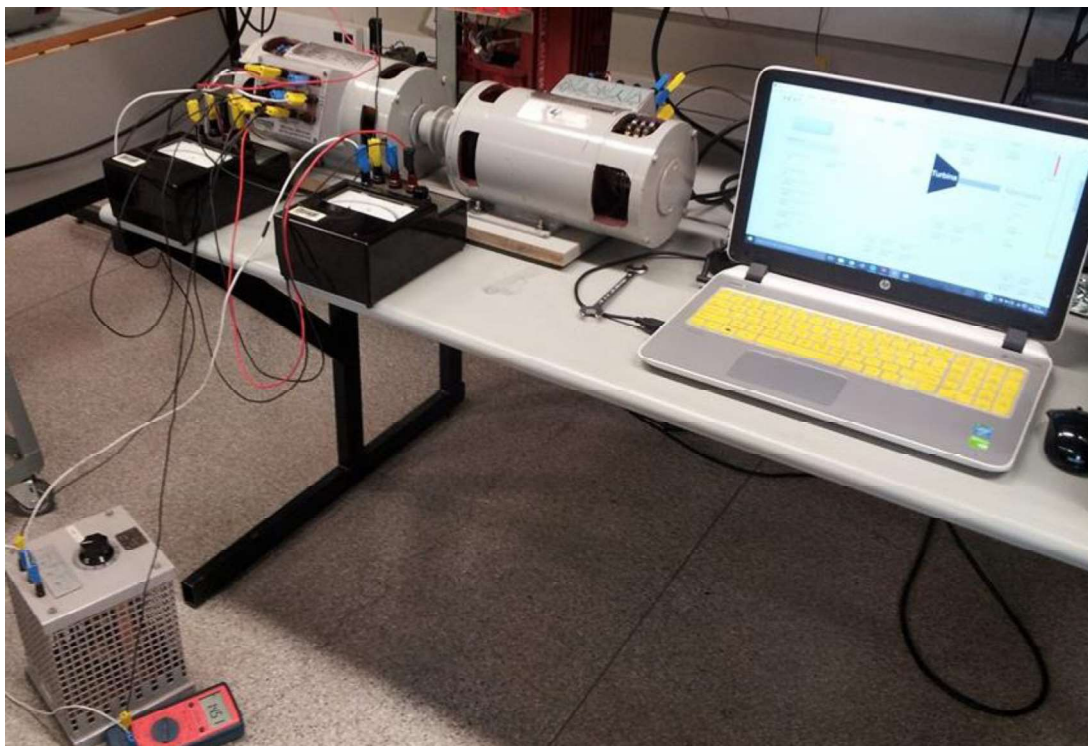


Figura 30: Testes experimentais utilizando-se do potenciômetro

6.4 Resultados experimentais

A seguir, estão alguns dos valores obtidos pelos ensaios realizados experimentalmente nas tabelas 9, 10 e 11. Nota-se também, nas Figuras 31 e 32 que a razão entre a potência elétrica do gerador síncrono e potência produzida do gerador síncrono geotérmico é aproximadamente sempre constante. Portanto, percebe-se que o sistema emulado aproxima-se da realidade. Além disso, percebe-se que para altas temperaturas do fluido geotérmico, a potência produzida é maior, assim como para altas pressões do fluido binário a potência produzida é maior.

Tabela 9: Primeiro cenário experimental

Sinal Analógico (Vcc)	LabView	
3,43	Pressão do Fluido Secundário (Bar)	15
	Temperatura do Fluido Geotérmico (°C)	100
	Potência elétrica produzida (MW)	17,5
	Cenário Real	
	Rotação (RPM)	1166
	Tensão de Linha (Vrms)	99,6
	Potência elétrica consumida (Watts)	105
Razão:	$(\text{Potência Real}/\text{Potência LabView}) * 1M$	6

Tabela 10: Segundo cenário experimental

Sinal Analógico (Vcc)	LabView	
5	Pressão do Fluido Secundário (Bar)	15
	Temperatura do Fluido Geotérmico (°C)	151,8
	Potência elétrica produzida (MW)	25,5
	Cenário Real	
	Rotação (RPM)	1700
	Tensão de Linha (Vrms)	127
	Potência elétrica consumida (Watts)	170
Razão:	$(\text{Potência Real}/\text{Potência LabView}) * 1M$	6,67

Tabela 11: Terceiro cenário experimental

Sinal Analógico (Vcc)	LabView	
2,94	Pressão do Fluido Secundário (Bar)	10
	Temperatura do Fluido Geotérmico (°C)	100
	Potência elétrica produzida (MW)	15
	Cenário Real	
	Rotação (RPM)	999
	Tensão de Linha (Vrms)	82,5
Potência elétrica consumida (Watts)	100	
Razão:	$(\text{Potência Real}/\text{Potência LabView}) * 1M$	6,67

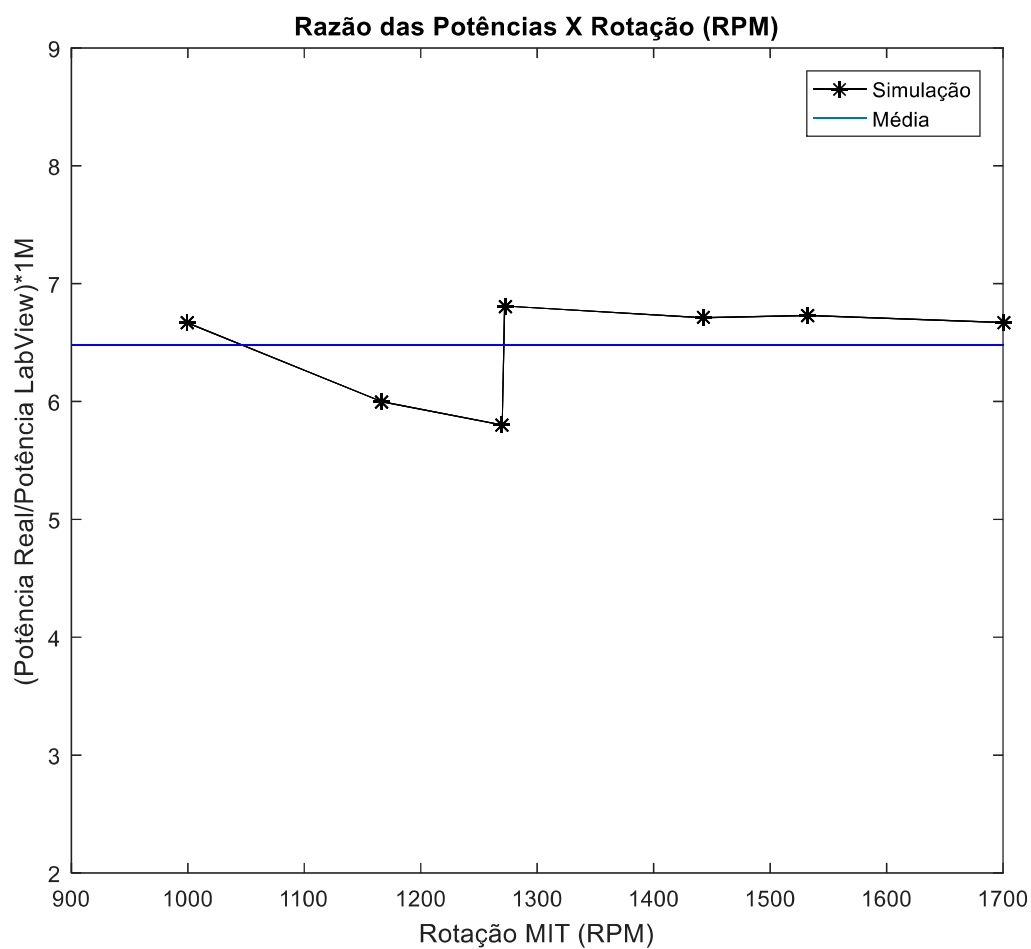


Figura 31: Gráfico indicando a variação da simulação em função da rotação

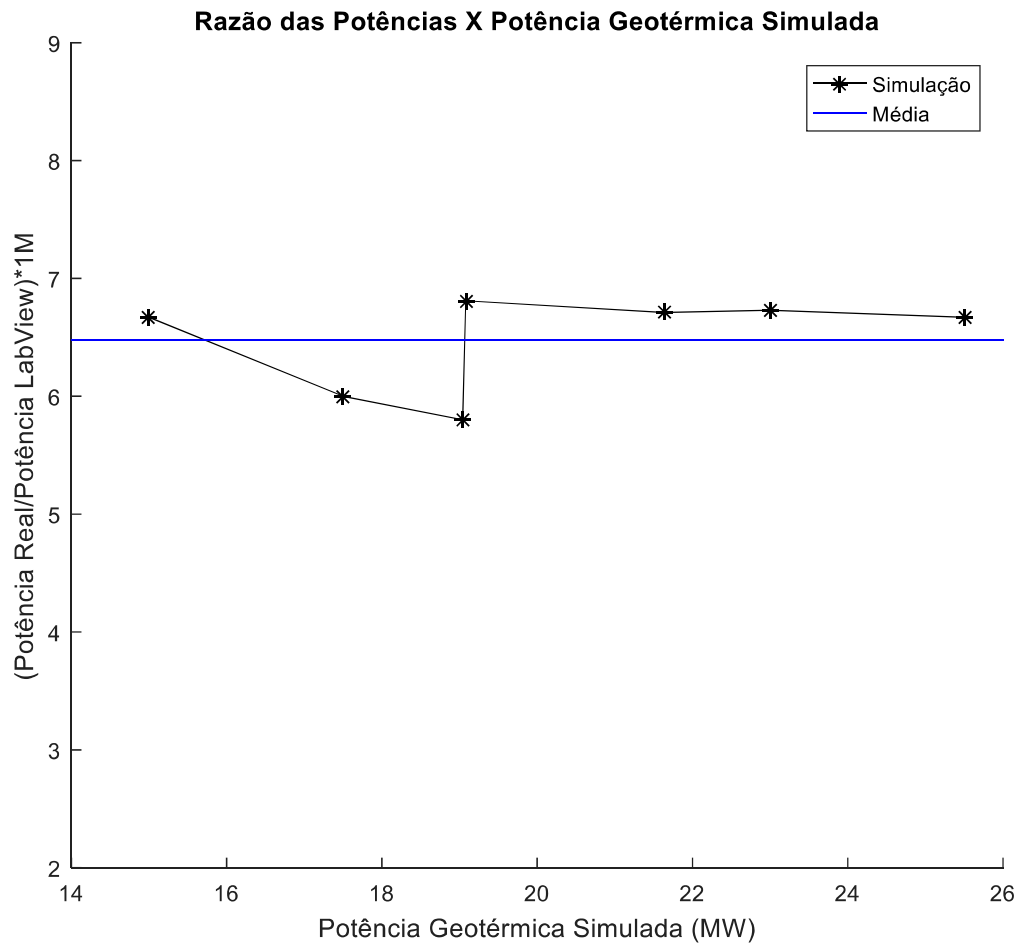


Figura 32: Gráfico indicando a variação da simulação em função da potência geotérmica simulada

6.5 Considerações finais

Os experimentos no laboratório conseguiram simular a máquina geotérmica, porém são necessários maiores estudos e simulações em razão de uma máquina de 370 kW simular potências da ordem de 20MW. Uma das soluções seria o uso de equipamentos com maiores potências, assim como maiores estudos em relação à pequenas mudanças do comportamento geotérmico afim de aproximar ainda mais à realidade do sistema.

Conclusão

É importante sempre considerar estudos envolvendo fontes de energia renováveis para uma possível redução da dependência de combustíveis fósseis. Portanto, tal trabalho apresenta um estudo relacionado sobre energia geotérmica e a simulação de um protótipo de central geotérmica no software LabView.

Assim, a simulação é crucial no julgamento da viabilidade do projeto em questões reais, por isso foi utilizado uma máquina de indução trifásica para emular a turbina do sistema. Através da emulação da realidade definiu-se que é importante aumentar as pesquisas envolvendo energia geotérmica para baixas entalpias através do ciclo binário. Tais estudos devem ocorrer, pois a ordem da potência simulada é muito diferente da potência real utilizada na máquina de indução. Assim, podem haver erros significativos em relação a essa diferença que não foram possíveis de serem obtidos.

Embora não se tenha uma lei de equações que descrevam o comportamento termodinâmico é necessário um estudo mais aprofundado em simulações para se poder aproveitar o uso de outras formas de obtenção de energia e assim não se limitar em apenas algumas fontes de energia. Em relação ao gráfico das Figuras 31 e 32, pode-se notar uma relação constante que define uma boa simulação da máquina geotérmica, a relação da potência real pela potência simulada multiplicada por 1M ficou sempre em torno de 6,5.

Finalmente, para trabalhos futuros, sugere maior aprofundamento nas simulações. Um exemplo disso, seria o uso de redes neurais inteligentes para que possa ser inseridos valores de entalpia de modo que a saída seja a potência produzida pela máquina geotérmica.

Referências Bibliográficas

- [1] BREMNER, S. **Geothermal Energy**. Lecture Notes (Sustainable & Renewable Energy Technologies) - School of the Photovoltaic and Renewable Energy Engineering. University of New South Wales, 2014.
- [2] Arboit, N.; Decezaro, S.; Amaral, G.; Liberalesso, T.; Mayer, V; Kemerich, P. Artigo, **Potencialidade de utilização da energia geotérmica no Brasil – Uma revisão de literatura**. Revista do Departamento de Geografia – USP, Volume 26 (2013), p. 155-168.
- [3] Faria, R.; Costa, G.; Dissertação de Mestrado. **Modelação térmica da Central Geotérmica do Pico Vermelho**. Universidade de Aveiro. Departamento de Energia Mecânica
- [4] Menezes, R.; Bezerra, F. Seminário I. **Energia Geotérmica: Aproveitamento**. Universidade Federal do Ceará, pg 25
- [5] _____. Ingenieros espanöles. Portal de ingenieros espanöles. Notícia. **Primera planta geotérmica de alta entalpia en España**. Espanha. Disponível em: <http://www.ingenieros.es/noticias/ver/primera-planta-geotandeacutermica-de-alta-entalpia-en-espaandntildea/2581>. Acessado dia 06 de agosto de 2015.
- [6] Hirano, E.; Mamani, L. Apresentação. **Algoritmos Evolucionários para Otimização, Multi-objetivo no projeto de sistemas térmicos**. Tópico Especiais em informática: Inteligência Computacional.
- [7] Franklin, E. Notas de Aula. **Ciclos de Potência a vapor - Ciclo de Rankine**. Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP
- [8] Castro, J. Apostila. **Refrigeração**. UNIVASF. Engenharia Mecânica

- [9] Lazzaris, R. **Acumuladores Hidráulicos**. Disponível em: <http://www.zemoleza.com.br/trabalho-academico/exatas/engenharia/acumuladores-hidraulicos/>. Acessado dia 06 de maio de 2015.
- [10] _____. **Como Construir na Prática**. Disponível em: <http://equipedeobra.pini.com.br/construcao-reforma/35/valvulas-redutoras-de-pressao-213991-1.aspx>. Acessado dia 04 de março de 2015.
- [11] Shapiro, M. **Fundamentals of engineering thermodynamics**.
- [12] _____. CalculoCC. **Interpolação Linear**. Disponível em: http://calculo.cc/temas/temas_bachillerato/primeros_ciencias_sociales/funciones_elementales/teoria/interpolacion_lineal.html. Acessado dia 06 de maio de 2015.
- [13] _____. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia. **Governadores: Mecânicos, Hidráulicos e Eletrônicos**. Seminário de Turbinas a vapor.
- [14] _____. Unijuí. **Turbinas a vapor**.
- [15] Fuentes, R. **Apostila de Automação Industrial**. Universidade Federal de Santa Maria. Colégio Técnico Industrial de Santa Maria. Curso de Eletrotécnica
- [16] Manteufel, R. Vídeo Aula. **Intro Organic Rankine Cycle**. University of Texas. San Antonio.
- [17] Maya, E.; Díaz, V.; Martínez, E.; Flores, J. Artigo, **Cascade utilization of low and medium enthalpy geothermal resources - A review**. Grupo de Eficiência Energética e Energia Renovável. Faculdade de engenharia mecânica - Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.
- [18] Costa, J. Seminário. **Ciclo Orgânico de Rankine**. Projeto Confortable. Cogen. Portugal.

[19] Sheth, S.; Shahidehpour, M. **Geothermal Energy in Power Systems**. Artigo. IEEE. Illinois Institute of Technology. Chicago, Illinois.

[20] Hammons, T. **Geothermal Power Generation Worldwide**. 2003. Artigo. IEEE. University of Glasgow, United Kingdom.

[21] _____. WEG. **Inversor de Frequência**. Manual de programação. CFW100 V2.3X

[22] _____. WEG. **Inversor de Frequência**. Catálogo. CFW100

[23] Yara, M. **Exergetic analysis of various types of geothermal power plants"**. 2009. **Artigo. Science Direct**. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili.

[24] Nag, P. **Power Plant Engineering**. The McGraw Hill Companies. Third Edition. 2008

[25] _____. Associação Americana de Energia Eólica, **Wind Blog**. Stanford School of Earth Sciences

Anexo

A Figura 33 mostra todo o processo do ciclo binário simulado, enquanto que as Figuras de 34 a 37 mostram o sistema em pequenas partes para que seja mais fácil sua visualização. Além disso, a Figura 38 demonstra a forma em que os valores foram inseridos em vetores para simulação. Finalmente, a Figura 39 contém o bloco de interpolação programado no LabView.

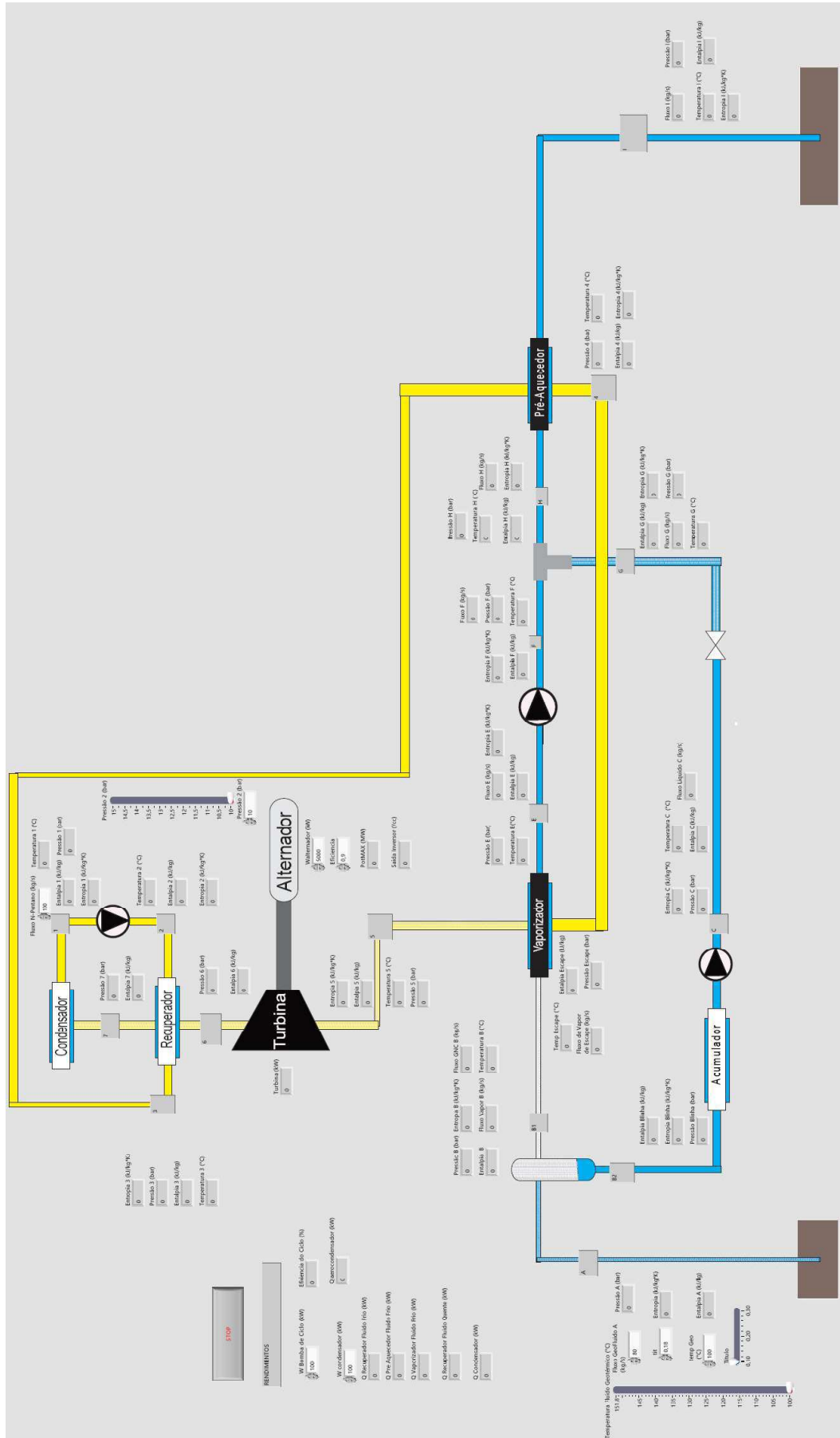


Figura 33: Modelo completo da simulação do “Front Panel” do LabView

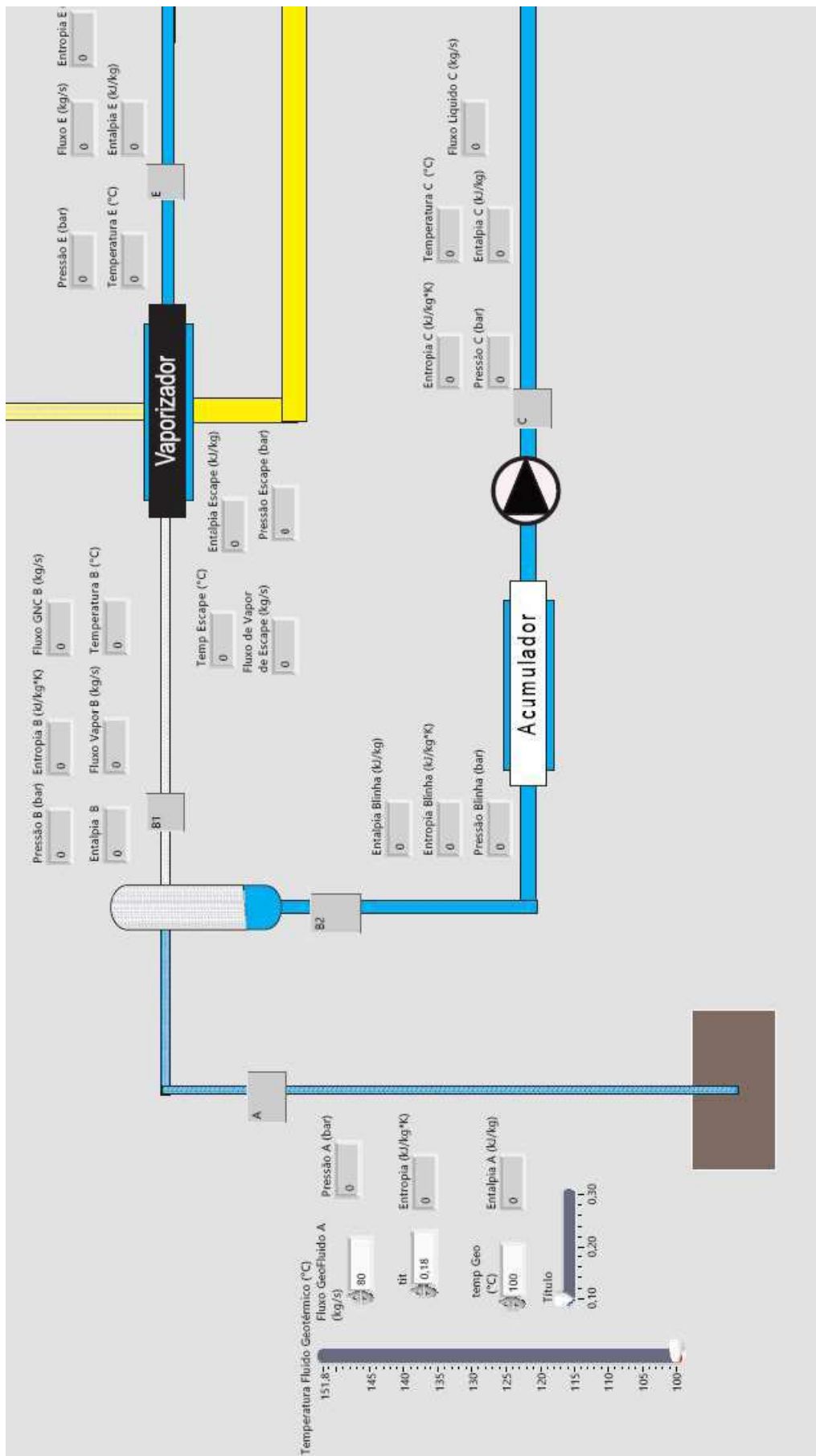


Figura 34: “Front Panel” do LabView mostrando a primeira parte da circulação do Geofluido

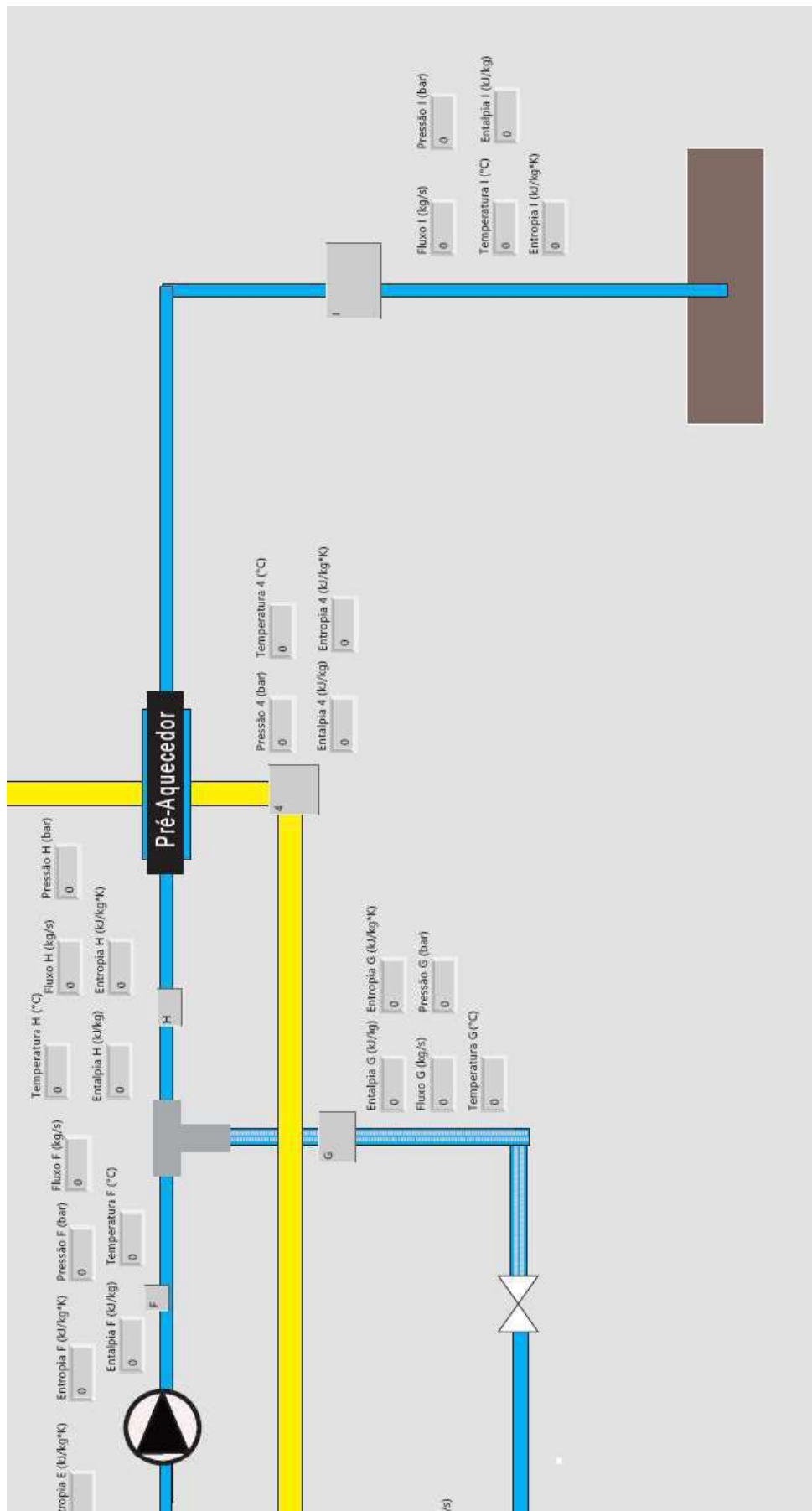


Figura 35: "Front Panel" do LabView mostrando a segunda parte da circulação do Geofluido

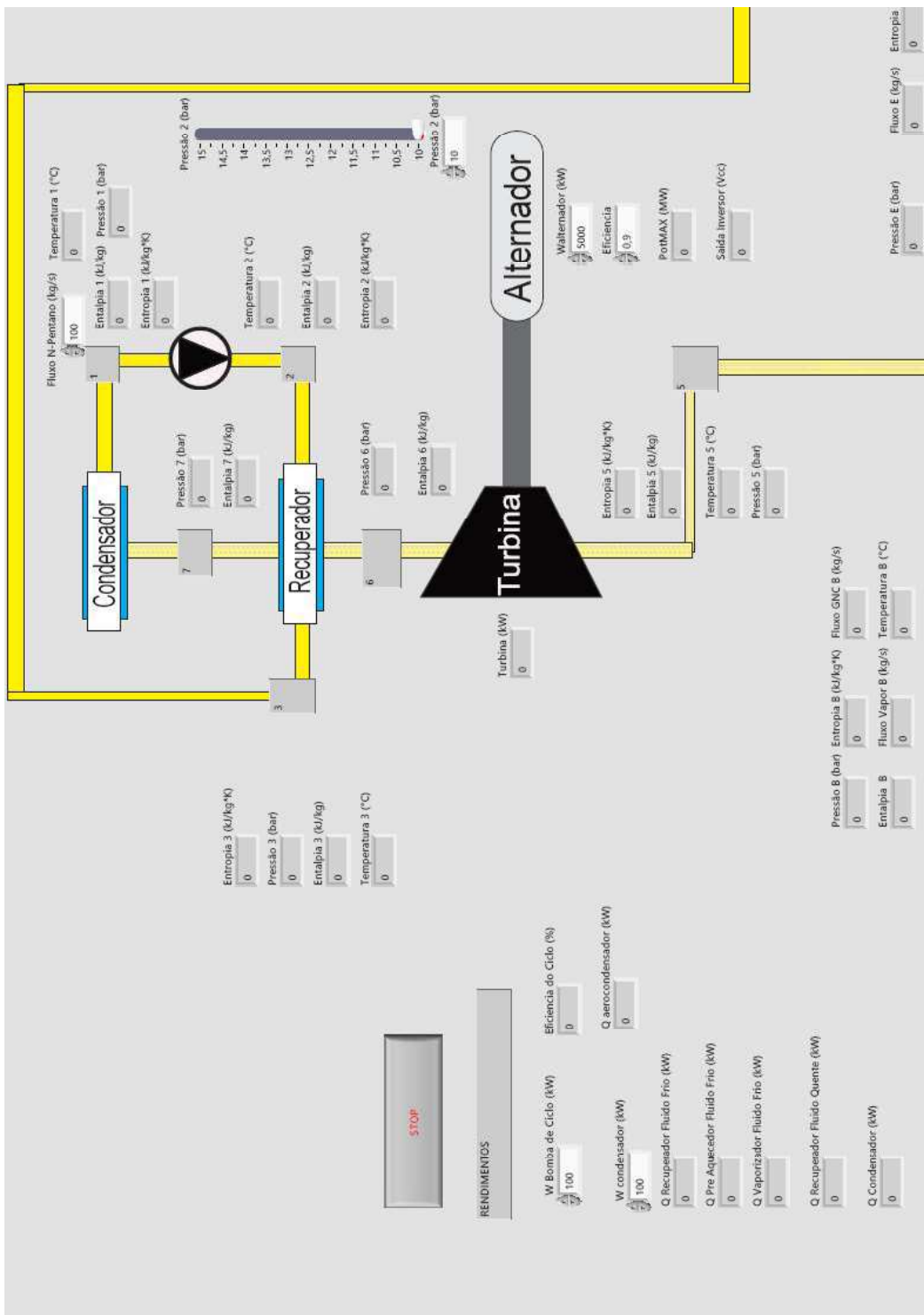


Figura 36: “Front Panel” do LabView mostrando a primeira parte da circulação do fluido secundário

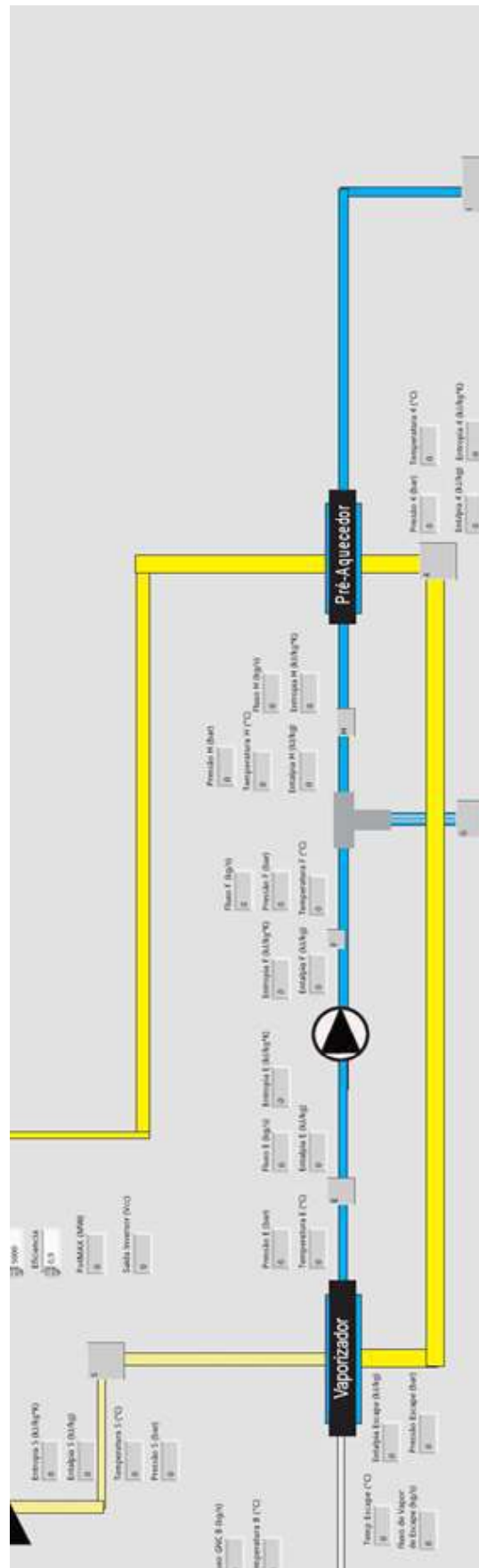


Figura 37: “Front Panel” do LabView mostrando a segunda parte da circulação do fluido binário

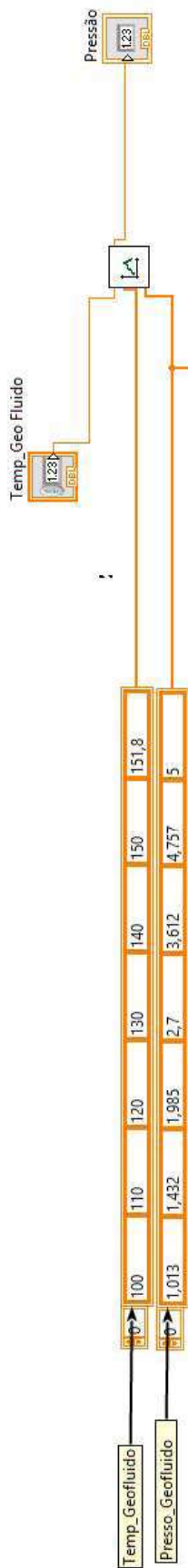


Figura 38: Diagrama do LabView mostrando a escolha de vetores para a interpolação

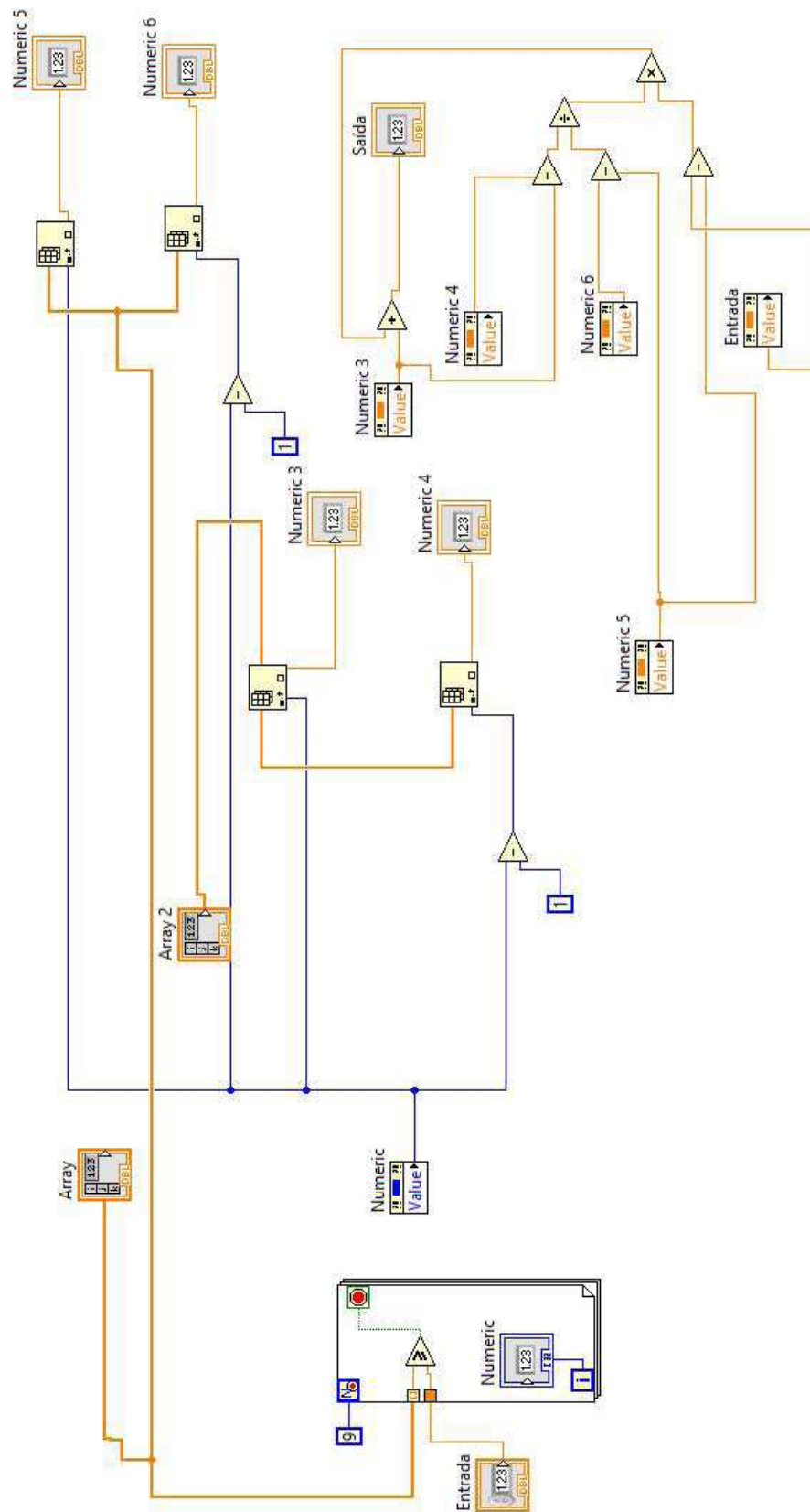


Figura 39: Diagrama do LabView mostrando a simulação do bloco da interpolação