

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

ESTUDO DO IMPACTO DA DISTÂNCIA ENTRE POÇOS PRODUTORES E INJETORES EM RESERVATÓRIOS GEOTÉRMICOS DE ALTA ENTALPIA.

AUTORES:

Juliana Baia Neves
Maria Eduarda Lemos Silva
Camilo Andrés Guerrero-Martin
Fernando Antonio Da Silva Fernandes

INSTITUIÇÃO:

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

ESTUDO DO IMPACTO DA DISTÂNCIA ENTRE POÇOS PRODUTORES E INJETORES EM RESERVATÓRIOS GEOTÉRMICOS DE ALTA ENTALPIA

Resumo

O objetivo deste estudo é investigar a influência da distância entre poços produtores e injetores sobre o desempenho, produtividade e a sustentabilidade de reservatórios geotérmicos de alta entalpia. Este trabalho visa avaliar como a variação na distância afeta a eficiência da recuperação de calor, determinar o impacto na longevidade operacional do reservatório e analisar a ocorrência de fenômenos indesejados, como a depleção prematura dos poços produtores. Com isso, pretende-se fornecer diretrizes para otimizar a operação e a gestão desses reservatórios, contribuindo para um uso mais eficiente desse tipo de energia. A abordagem utilizada neste estudo envolve simulações numéricas de reservatórios geotérmicos usando o software SAM (System Advisor Model), utilizando modelos tridimensionais de fluxo e transporte de calor. Inicialmente, configura-se um modelo base representativo de um reservatório geotérmico de alta entalpia. Em seguida, implementam-se diferentes cenários de distâncias entre poços produtores e injetores, variando de 1500 a 3500 metros. Os resultados foram analisados com foco na temperatura dos fluidos produzidos, pressão do reservatório e eficiência da recuperação de calor. Os resultados deste estudo mostram que a distância entre os poços produtores e injetores tem um impacto significativo no desempenho do reservatório. Este estudo apresenta informações novas e adicionais ao corpo existente de literatura sobre a gestão de reservatórios geotérmicos. Ao quantificar o impacto das diferentes distâncias entre poços, o estudo oferece insights práticos para a otimização de projetos de sistemas geotérmicos, contribuindo para um melhor entendimento da dinâmica térmica e de pressão em reservatórios de alta entalpia. Esta pesquisa pode beneficiar a indústria do petróleo ao fornecer diretrizes para melhorar a eficiência energética e a viabilidade econômica de operações geotérmicas.

Palavras-chave: Alta Entalpia, Reservatórios Geotérmicos, SAM (System Advisor Model).

Abstract

The objective of this study is to investigate the influence of the distance between producing and injecting wells on the performance, productivity and sustainability of high-enthalpy geothermal reservoirs. This work aims to evaluate how variation in distance affects the efficiency of heat recovery, determine the impact on the operational longevity of the reservoir and analyze the occurrence of undesirable phenomena, such as premature depletion of producing wells. With this, the aim is to provide guidelines to optimize the operation and management of these reservoirs, contributing to a more efficient use of this type of energy. The approach used in this study involves numerical simulations of geothermal reservoirs using SAM (System Advisor Model) software, using three-dimensional flow and heat transport models. Initially, a base model representative of a high-enthalpy geothermal reservoir is configured. Next, different scenarios of distances between producing and injecting wells are implemented, ranging from 1500 to 3500 meters. The results were analyzed focusing on the temperature of the fluids produced, reservoir pressure and heat recovery efficiency. The results of this study show that the distance between producing and injecting wells has a

significant impact on reservoir performance. This study presents new and additional information to the existing body of literature on geothermal reservoir management. By quantifying the impact of different distances between wells, the study offers practical insights for optimizing geothermal system designs, contributing to a better understanding of thermal and pressure dynamics in high-enthalpy reservoirs. This research can benefit the petroleum industry by providing guidelines to improve the energy efficiency and economic viability of geothermal operations.

Keywords: High Enthalpy, Geothermal Reservoirs, SAM (System Advisor Model).

1 Introdução

A demanda crescente por obtenção e produção de energias renováveis vem crescendo rotineiramente e está levando à exploração cada vez maior de novas fontes alternativas de energia, dentre tais fontes, a energia geotérmica é normalmente retratada como sendo a energia oriunda do interior da terra, energia esta que pode ser extraída, através de uma fábrica ou usina geotérmica gerando assim energia elétrica. Sendo considerada uma fonte de energia renovável e sustentável. Ademais, ao contrário de outras fontes renováveis como eólica e solar, a energia geotérmica independe das condições climáticas do ambiente em questão, dessa forma, fornecendo uma fonte constante de eletricidade, proveniente da mesma. Sendo assim, podem funcionar 24 horas por dia/7 dias por semana. Além disso, as usinas geram um baixo impacto e a produção de resíduos chega a ser mínima. (LINS,2023).

A Energia Geotérmica é transformada em energia elétrica através de uma usina. Sendo injetado água para ser aquecida e transformada em vapor quente e posteriormente em eletricidade. (Campos et al., 2017). Os reservatórios geotérmicos estão presentes em sua maioria nas rochas calcárias, sendo “câmaras” com elevadas temperaturas, possuem pouca porosidade, de tal modo em que se injeta água e é extraído vapor. Dito isto, a influência da distância entre poços produtores e injetores sobre o desempenho, produtividade e a sustentabilidade de reservatórios geotérmicos de alta entalpia irá ser investigado visto que a variação na distância afeta a eficiência da recuperação de calor, determina o impacto na longevidade operacional do reservatório e analisa a ocorrência de fenômenos indesejados, como a depleção prematura dos poços produtores.

Portanto, a abordagem utilizada neste estudo envolve simulações numéricas de reservatórios geotérmicos utilizando o software SAM (System Advisor Model), com o auxílio de modelos tridimensionais de fluxo e transporte de calor. Deste modo, ao quantificar o impacto das diferentes distâncias entre poços, o estudo oferece insights práticos para a otimização de projetos de sistemas geotérmicos, contribuindo para um melhor entendimento da dinâmica térmica e de pressão em reservatórios de alta entalpia.

2 Metodologia

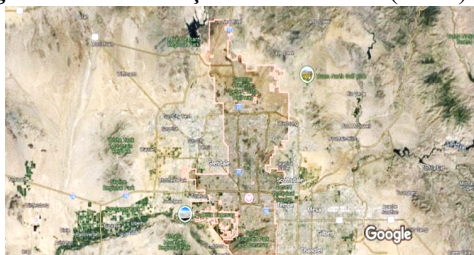
O estudo foi dividido em três cenários: O primeiro cenário intitulado Reservatório A possui uma distância de 1500m (metros) do Poço Produtor ao Poço Injetor da localidade em questão, o segundo cenário, Reservatório B, possui a distância equivalente a 2500m (metros) e o terceiro cenário, Reservatório C a 3500m (metros). A abordagem utilizada por meio do software SAM (System Advisor Model) permitiu que pudéssemos obter variáveis valores característicos de cada reservatório geotérmico e compararmos segundo as suas devidas distâncias.

2.1 Condições Ambientais

Neste módulo foi selecionada a localização base para a área de estudo. As simulações foram realizadas com base na localidade de Phoenix, capital do Arizona/EUA. Possui um grande potencial de energia

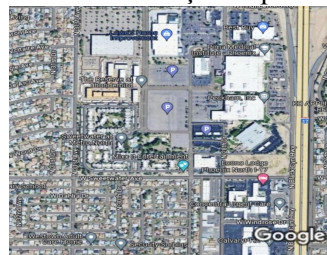
geotérmica. Com a presença de um clima árido e conhecido por suas temperaturas elevadas durante todo o ano, Phoenix bateu o recorde como a cidade que atingiu a maior média de temperatura em um mês na história dos EUA. Assim, sendo considerada umas das regiões mais secas e desérticas do estado, no centro do deserto de Sonora, conforme as figuras 1 e 2.

Figura 1- Localização Phoenix/AZ (EUA)



Fonte: Google Maps

Figura 2 - Localização Específica



Fonte: Google Maps

2.2 Recurso Geotérmico

Nesta etapa, foi abordado o reservatório geotérmico em que deseja-se analisar, suas características específicas, bem como, permeabilidade, largura e altura do reservatório, a distância entre os poços de injeção e produção, assim como, entradas de modelos de fratura EGS (Sistema Geotérmico Aprimorado) e mudanças de pressão no reservatório. Para a pesquisa, onde possui o objetivo geral analisar a influência das distâncias entre o poço injetor e produtor de um reservatório geotérmico, apenas variou o valor da distância, permanecendo, assim, constante os demais valores para as três simulações. Deste modo, criando os três casos a serem estudados.

Primeiramente, analisou-se as influências com relação ao Reservatório A (1500m). Posteriormente, ao Reservatório B (2500m) e Reservatório C (3500m) do poço injetor ao poço produtor. Após a simulação, os dados dos reservatórios foram estipulados nas Tabelas 1 e 2 referentes aos três cenários.

Tabela 1 - Dados de Reservatório e Poço.

Reservatório A		Reservatório B		Reservatório C	
Propriedade	Valor	Propriedade	Valor	Propriedade	Valor
Permeabilidade (D)	0,05	Permeabilidade (D)	0,05	Permeabilidade (D)	0,05
Largura (m)	500	Largura (m)	500	Largura (m)	500
Altura (m)	100	Altura (m)	100	Altura (m)	100
Distância entre poço produtor e injetor (m)	1500	Distância entre poço produtor e injetor (m)	2500	Distância entre poço produtor e injetor (m)	3500
Profundidade (m)	2000	Profundidade (m)	2000	Profundidade (m)	2000
Temperatura média do reservatório (°C)	200°C	Temperatura média do reservatório (°C)	200°C	Temperatura média do reservatório (°C)	200°C
Mudança de pressão através do reservatório (psi)	1495,627	Mudança de pressão através do reservatório (psi)	2492,712	Mudança de pressão através do reservatório (psi)	3489,796
Pressão de fundo do poço do produtor (psi)	1216,397 psi	Pressão de fundo do poço do produtor (psi)	219,312 psi	Pressão de fundo do poço do produtor (psi)	-777,772 psi

Tabela 2 - Dados do Modelo de Fratura - Reservatórios A, B e C.

Propriedade	Valor
Distância entre fraturas (m)	50
Comprimento da fratura (m)	1000
Abertura da fratura (m)	0,0004
Quantidade de fraturas	6
Largura da fratura (m)	175
Ângulo da fratura (°)	15
Densidade da rocha (Kg/m³)	2,600.000
Calor específico da rocha (J/Kg.°C)	950.000
Condutividade térmica da rocha (W/m.k)	3,000
Perda de água subterrânea (% de água injetada)	2

2.3 Planta e Equipamentos

Neste módulo estão presentes os valores de dimensionamento da planta. Considerando que o termo planta refere-se ao sistema de máquinas onde será gerado a energia elétrica. Especificamente, nesta sessão a opção de saída permitiu especificar a capacidade elétrica em quilowatts. Deste modo, ao selecionar o número exato de poços, o SAM calculou o tamanho da planta necessário para garantir que a produção líquida da planta atenda a qualquer requisito de produção, com energia extra de carga definida pelos valores do projeto calculado. Já os parâmetros de declínio de temperatura determinam quando e com que frequência o projeto exigirá a perfuração de novos poços e estão relacionados ao potencial total de recursos.

A taxa de fluxo do poço e a temperatura determinam, quanta energia está disponível para conversão em eletricidade. Pois, quanto maior a vazão mais vapor (ou água quente) se move através do sistema, disponibilizando energia térmica para conversão. O que por sua vez, retrata que menos poços serão perfurados, portanto, menor despesa de capital. Deste modo, os dados de entrada estão estipulados na tabela 3.

Tabela 3 - Planta e Equipamentos

Reservatório A		Reservatório B		Reservatório C	
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Produção bruta da planta (MW)	43.372	Produção bruta da planta (MW)	57.003	Produção bruta da planta (MW)	83.427
Produção líquida da planta (MW)	30.000	Produção líquida da planta (MW)	30.000	Produção líquida da planta (MW)	30.000
Eficiência da planta (%)	80	Eficiência da planta (%)	80	Eficiência da planta (%)	80
Eficiência real da planta (w-hr/lb)	9.225	Eficiência real da planta (w-hr/lb)	9.225	Eficiência real da planta (w-hr/lb)	9.225
Nº de poços em análise	5	Nº de poços em análise	7	Nº de poços em análise	10
Temperatura da planta (°C)	200	Temperatura da planta (°C)	200	Temperatura da planta (°C)	200
Taxa de declínio de temperatura (%/ano)	0.5	Taxa de declínio de temperatura (%/ano)	0.5	Taxa de declínio de temperatura (%/ano)	0.5
Declínio máximo de temperatura (°C)	30	Declínio máximo de temperatura (°C)	30	Declínio máximo de temperatura (°C)	30
Taxa de fluxo do poço de produção (kg/s)	110	Taxa de fluxo do poço de produção (kg/s)	110	Taxa de fluxo do poço de produção (kg/s)	110
Eficiência da bomba (%)	67.5	Eficiência da bomba (%)	67.5	Eficiência da bomba (%)	67.5
Diferença de pressão em equipamentos de superfície (pontos)	40	Diferença de pressão em equipamentos de superfície (pontos)	40	Diferença de pressão em equipamentos de superfície (pontos)	40
Excesso de pressão na sucção da bomba (psi)	50	Excesso de pressão na sucção da bomba (psi)	50	Excesso de pressão na sucção da bomba (psi)	50
Profundidade da bomba (ft)	4241.733	Profundidade da bomba (ft)	6976.504	Profundidade da bomba (ft)	9732.403
Trabalho da bomba (MW)	13.372	Trabalho da bomba (MW)	27.003	Trabalho da bomba (MW)	53.427
Tamanho da bomba de produção (HP)	2770.790	Tamanho da bomba de produção (HP)	4557.201	Tamanho da bomba de produção (HP)	6357.413
Tamanho da bomba de injeção (HP)	2245.227	Tamanho da bomba de injeção (HP)	2953.771	Tamanho da bomba de injeção (HP)	4327.268

2.4 Parâmetros Financeiros

Por fim, foram analisados os parâmetros financeiros correspondentes aos cenários simulados. Observa-se que os parâmetros de análise especificam o período de análise correspondente a 20 anos, equivalente a vida do projeto ou investimento, assim como, a taxa de inflação, normalmente baseada em um índice de preços, o SAM utiliza a taxa de inflação no valor padrão equivalente a 2,5% baseado nos dados do índice de preços do consumidor do Bureau of Labor Statistic do Departamento do trabalho dos EUA. Além da taxa de desconto, expressa como uma porcentagem anual.

Deste modo, os impostos e as taxas de seguro aplicam-se à alíquota anual do imposto de renda federal e estadual ao lucro tributável e é utilizada para calcular os benefícios e obrigações fiscais do projeto. Nos primeiros anos, a taxa é zero. Bem como, para projetos residuais e comerciais, a SAM não considera o valor da eletricidade poupada pelo sistema como rendimento tributável. Ademais, o SAM considera o valor residual como a receita do projeto no último ano do fluxo de caixa do projeto e calcula o valor como uma porcentagem do custo total instalado do valor operacional. Sendo assim, obteve-se os seguintes valores para os devidos cenários trabalhados, listados na tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros financeiros

Reservatório A

Parâmetro	Valor
Capacidade do sistema (kW)	43,371.71
Custo de capital (\$)	152,049,620.34
Custo operacional fixo anual (\$)	6,087,700.00
Custo operacional variável (\$/kWh)	0
Período de análise (anos)	20
Taxa de inflação (%/ano)	2.5
Taxa interna de retorno nominal (%/ano)	13
Dívida a prazo do projeto (% do custo de capital)	60
Taxa de juros nominal da dívida (%/ano)	7
Taxa de imposto efetiva (%/ano)	28
Fator de recuperação de capital (CRF)	0.084
Fator de financiamento do projeto (PFF)	1.075
Fator de financiamento da construção (CFF)	1.039
Custo operacional variável (\$)	0.00
WACC	0.056

Reservatório B

Parâmetro	Valor
Capacidade do sistema (kW)	57,003.49
Custo de capital (\$)	200,474,107.25
Custo operacional fixo anual (\$)	6,087,700.00
Custo operacional variável (\$/kWh)	0
Período de análise (anos)	20
Taxa de inflação (%/ano)	2.5
Taxa interna de retorno nominal (%/ano)	13
Dívida a prazo do projeto (% do custo de capital)	60
Taxa de juros nominal da dívida (%/ano)	7
Taxa de imposto efetiva (%/ano)	28
Fator de recuperação de capital (CRF)	0.084
Fator de financiamento do projeto (PFF)	1.075
Fator de financiamento da construção (CFF)	1.039
Custo operacional variável (\$)	0.00
WACC	0.056

Reservatório C

Parâmetro	Valor
Capacidade do sistema (kW)	83,427.41
Custo de capital (\$)	293,841,536.65
Custo operacional fixo anual (\$)	6,087,700.00
Custo operacional variável (\$/kWh)	0
Período de análise (anos)	20
Taxa de inflação (%/ano)	2.5
Taxa interna de retorno nominal (%/ano)	13
Dívida a prazo do projeto (% do custo de capital)	60
Taxa de juros nominal da dívida (%/ano)	7
Taxa de imposto efetiva (%/ano)	28
Fator de recuperação de capital (CRF)	0.084
Fator de financiamento do projeto (PFF)	1.075
Fator de financiamento da construção (CFF)	1.039
Custo operacional variável (\$)	0.00
WACC	0.056

3 Resultados e Discussão

Os resultados obtidos, após a simulação, estão apresentados nos gráficos de 1 a 10, conforme os cenários estipulados referentes aos Reservatórios A (1500m), B (2500m) e C (3500m). Estão presentes parâmetros que correspondem ao Reservatório A equivalentes à: Energia CA anual = 260,850,144 kWh, Fator de Capacidade anual = 99,3% e Custo nivelado de energia = 7,82€/kWh. Já o Reservatório B, Energia CA anual = 260,236,296 kWh, Fator de Capacidade anual = 99,0% e Custo nivelado de energia = 9,59 €/kWh. Por fim o Reservatório C equivalente à: Energia CA anual = 259.049.360 kWh, Fator de Capacidade anual = 98,6% e Custo nivelado de energia = 13,02€/kWh.

Figura 1- Reservatório A

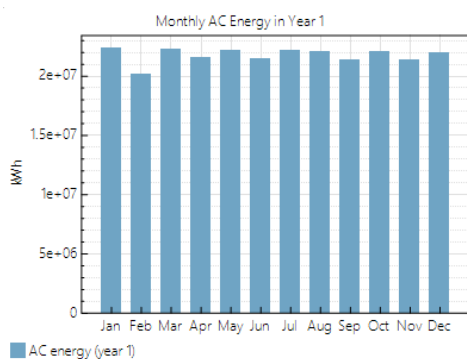


Figura 2 - Reservatório B

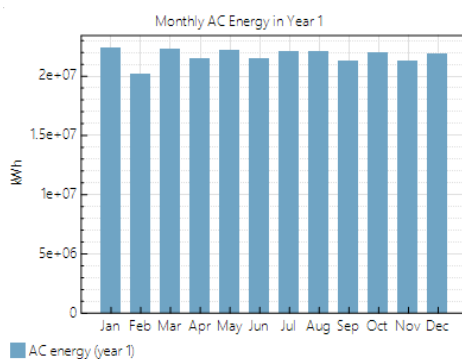


Figura 3 - Reservatório C

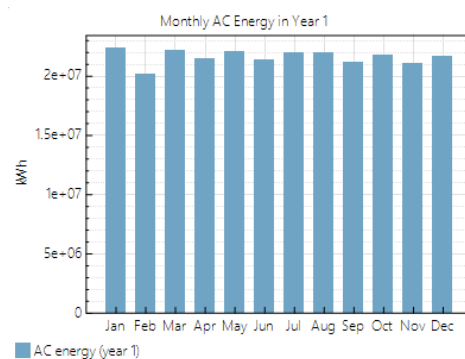


Figura 4 - Reservatório A

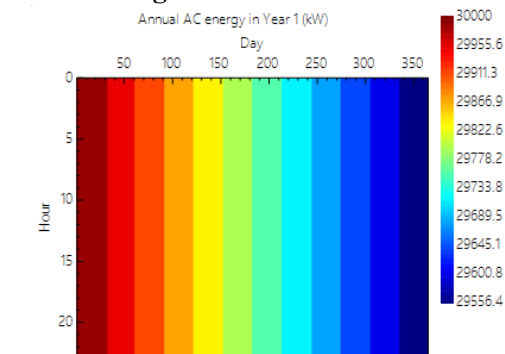


Figura 5 - Reservatório B

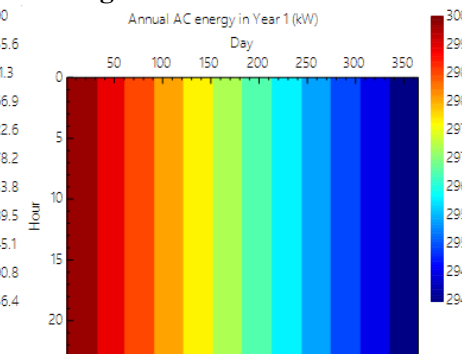
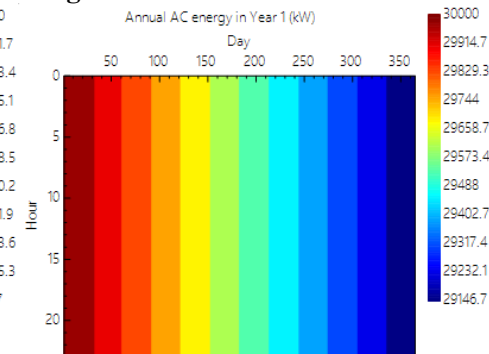
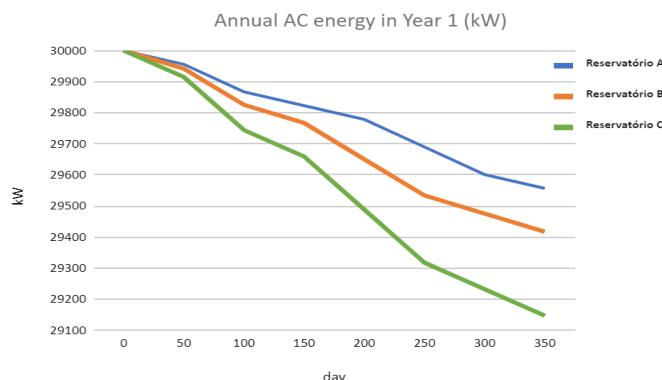


Figura 6 - Reservatório C



Assim, as figuras representantes dos gráficos listados acima correspondem a energia mensal no ano (figuras 1, 2 e 3), seguidos da energia a cada 50 dias/5 horas (figuras 4, 5, 6 e 7). Na figura 7, pode-se observar o gráfico bidimensional do desempenho de cada um dos reservatórios.

Figura 7 - Reservatórios A, B e C.



Nota-se que a constância dos parâmetros se dá, pois a energia geotérmica é constante ao longo de todo o ano, sendo rotineiro produzir energia independente do período do dia ou condições climáticas da região. Deste modo, as figuras a seguir representantes dos gráficos de 8 a 10 da curva da produção de vapor ao longo de um ano, a diminuição ocorre pois leva-se em consideração que a produção de vapor no reservatório que não está tendo tempo de recarga ou descarga, ou seja, está sendo trabalhado constantemente e a medida que está se injetando água (25°) a temperatura começa a diminuir e a produção de energia elétrica diminui em conjunto com a produção de vapor ao longo dos meses. Levando em consideração, a distância entre o poço injetor e produtor. Deste modo, em alguns casos, espera-se que a temperatura do reservatório estabilize para posteriormente dar continuidade na produção.

Figura 8 - Reservatório A

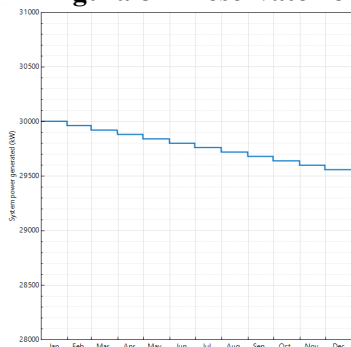


Figura 9 - Reservatório B

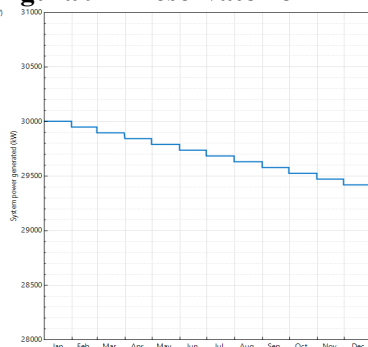
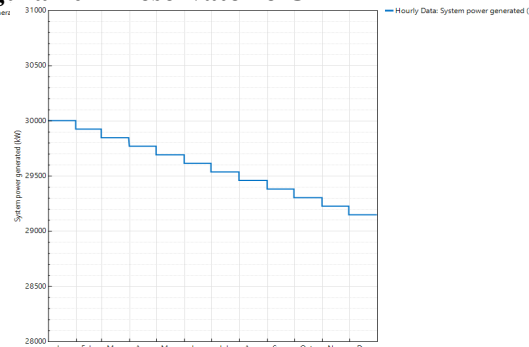


Figura 10 - Reservatório C



Os resultados foram analisados com foco na temperatura dos fluidos produzidos, pressão do reservatório e eficiência da recuperação de calor. O estudo mostra que a distância entre os poços produtores e injetores possuem um impacto significativo no desempenho do reservatório. Distâncias menores (500-1000 metros) resultam em um declínio mais rápido dos poços produtores, diminuindo a eficiência da recuperação de calor após os primeiros anos de operação. Por outro lado, distâncias intermediárias (1000-2000 metros) proporcionam um equilíbrio entre a manutenção da temperatura do

fluido produzido e a pressão do reservatório, favorecendo uma operação sustentável a longo prazo. Distâncias maiores (2000-3000 metros) reduzem significativamente o risco de declinação prematura, mas podem resultar em maiores custos operacionais devido ao maior comprimento das tubulações e possíveis perdas de calor ao longo do trajeto.

4 Conclusões

A pesquisa concluiu que a otimização da distância entre poços é crucial para maximizar a eficiência e a sustentabilidade dos sistemas geotérmicos de alta entalpia. Distâncias menores (500-1000 metros) resultam em um declínio mais rápido dos poços produtores, diminuindo a eficiência da recuperação de calor após os primeiros anos de operação. Por outro lado, percebe-se que distâncias intermediárias (1000-2000 metros) proporcionam um equilíbrio entre a manutenção da temperatura do fluido produzido e a pressão do reservatório, favorecendo uma operação sustentável a longo prazo.

Distâncias maiores (2000-3000 metros) reduzem significativamente o risco de declinação prematura, mas podem resultar em maiores custos operacionais devido ao maior comprimento das tubulações e possíveis perdas de calor ao longo do trajeto. Este estudo apresentou informações novas e adicionais ao corpo existente de literatura sobre a gestão de reservatórios geotérmicos. Ao quantificar o impacto das diferentes distâncias entre poços, o estudo ofereceu insights práticos para a otimização de projetos de sistemas geotérmicos, contribuindo para um melhor entendimento da dinâmica térmica e de pressão em reservatórios de alta entalpia. Por fim, enfatiza-se a importância desta pesquisa, a benefício da indústria do petróleo, bem como, ao aprimoramento das energias alternativas nas produções de petróleo ao fornecer diretrizes para melhorar a eficiência energética e a viabilidade econômica de operações geotérmicas.

5 Referências Bibliográficas

MALUF, Thales. **Análise comparativa de custos e técnicas de perfuração de poços para a produção de água, energia geotérmica, petróleo e gás natural**. 2022. 103 f. TCC (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia e Ciências, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2022.

LINS, Eduardo Jorge da Cunha. **Avaliação microestrutural e mecânica de pastas de cimento contendo cinza da casca do arroz e sílica flúor para poços geotérmicos**. Programa de pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2023.

SOUSA, M. E. F. DE. **Fontes energéticas disponíveis para autogeração de energia elétrica na mineração** : vantagens e desvantagens. www.monografias.ufop.br, 2023.

MONTENEGRO, T. S., & Costa Júnior, M. A. (2020). **Utilização de poços de petróleo abandonados para a produção de energia geotérmica**. Caderno De Graduação - Ciências Exatas E Tecnológicas - UNIT - SERGIPE.

CAMPOS, A. F. et al. **Um panorama sobre a energia geotérmica no Brasil e no Mundo: Aspectos ambientais e econômicos** A panorama of the geothermal energy in Brazil and the World: Environmental and economic aspects. [s.l: s.n.]