



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA

CURSO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**AVALIAÇÃO DO AQUECIMENTO ELETROMAGNÉTICO
RESISTIVO APLICADO A UM RESERVATÓRIO DE ÓLEO PESADO**

ANTHONY ANDREY RAMALHO DINIZ

NATAL/RN
ABRIL / 2014

ANTHONY ANDREY RAMALHO DINIZ

**AVALIAÇÃO DO AQUECIMENTO ELETROMAGNÉTICO
RESISTIVO APLICADO A UM RESERVATÓRIO DE ÓLEO PESADO**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Curso de Engenharia de Petróleo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro de Petróleo.

Orientadora: Prof. Dra. Jennys Lourdes Meneses Barillas

NATAL/RN

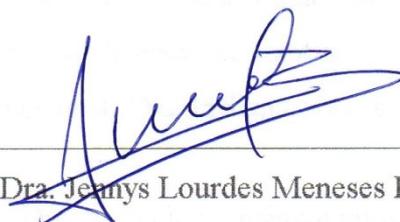
ABRIL / 2014

ANTHONY ANDREY RAMALHO DINIZ

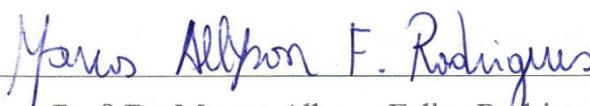
**AVALIAÇÃO DO AQUECIMENTO ELETROMAGNÉTICO
RESISTIVO APLICADO A UM RESERVATÓRIO DE ÓLEO PESADO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi avaliado e considerado adequado como requisito parcial na obtenção do título de Engenheiro de Petróleo pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Natal, 19 de Maio de 2014.



Prof. Dra. Jenyns Lourdes Meneses Barillas
Orientadora – UFRN



Prof. Dr. Marcos Allyson Felipe Rodrigues
Interno – UFRN



Prof. Dra. Vanessa Cristina Santanna
Interno – UFRN

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pelo dom da vida e as várias graças alcançadas no decorrer da caminhada.

Aos meus pais, pelas orientações e apoio.

Aos prof. Dra. Renata Câmara e prof. M.Sc. Esdras Matheus, porque foram indispensáveis para que esse caminho fosse tomado.

À prof. Dra. Jennys Barillas, por aceitar guiar meus passos nos momentos mais difíceis da caminhada, pela paciência e ensinamentos.

À prof. Dra. Carla Maitelli, pelos conselhos e ensinamentos, primordiais na caminhada.

A Hannah Lícia e Tatiane Santos, pela parceria e empenho, sempre atuando para que pudéssemos entregar os nossos melhores resultados.

A Edson Andrade e Glauco Braga, pela amizade e parceria.

A Keylly Eyglys, Robinson Alves, João Paulo, Mademerson Leandro e Rodrigo Silva, pela parceria e momentos de diversão no LabSis.

Às prof. Dra. Ana Maria e prof. Dra. Heliana Soares, pelo “ouvido amigo” e tardes de cafezinho.

Ao prof. Dr. Adrião Duarte, pelos ensinamentos e companhia nos eventos científicos.

Aos demais professores do Departamento, em especial aos Prof. Wilson da Mata, Prof. Marcos Allyson e Prof. Tarcílio Viana, pelas importantes contribuições acadêmicas.

Aos demais colegas de curso, em especial a Talitha Borges, Walter Mousinho, Alyson Dantas, pelos momentos de riso e alegria.

Aos colegas do LEAP, em especial a Júnior Paiva, Anderson Leão, Davi Monteiro e Júlio César, pela amizade e momentos de diversão.

Ao pessoal da Academia Newlife, em especial a Suely Lira e Débora Caravina, que me fizeram rir muito nos momentos em que foi preciso.

A Hitaécio Coelho e Flávio Carneiro, que souberam os momentos certos para me animar.

Aos Prof. Dr. Osvaldo Chiavone e Maria Brunet, pela amizade e parceria.

Ao Computer Modelling Group Ltd. (CMG), pelo programa de simulação numérica, que viabilizou esse estudo.

*“Ando devagar
Porque já tive pressa
E levo esse sorriso
Porque já chorei demais*

*Hoje me sinto mais forte
Mais feliz, quem sabe
Só levo a certeza
De que muito pouco sei
Ou nada sei*

*Conhecer as manhas
E as manhãs
O sabor das massas
E das maçãs*

*É preciso amor
Pra poder pulsar
É preciso paz pra poder sorrir
É preciso a chuva para florir*

*Penso que cumprir a vida
Seja simplesmente
Compreender a marcha
E ir tocando em frente*

*Como um velho boiadeiro
Levando a boiada
Eu vou tocando os dias
Pela longa estrada, eu vou
Estrada eu sou*

*Conhecer as manhas
E as manhãs
O sabor das massas
E das maçãs*

*É preciso amor
Pra poder pulsar
É preciso paz pra poder sorrir
É preciso a chuva para florir*

*Todo mundo ama um dia
Todo mundo chora
Um dia a gente chega
E no outro vai embora*

*Cada um de nós compõe a sua história
Cada ser em si
Carrega o dom de ser capaz
E ser feliz*

*Conhecer as manhas
E as manhãs
O sabor das massas
E das maçãs*

*É preciso amor
Pra poder pulsar
É preciso paz pra poder sorrir
É preciso a chuva para florir*

*Ando devagar
Porque já tive pressa
E levo esse sorriso
Porque já chorei demais*

*Cada um de nós compõe a sua história
Cada ser em si
Carrega o dom de ser capaz
E ser feliz”*

(Almir Sater)

RESUMO

Na indústria do petróleo, o óleo pesado tem sido geralmente um recurso preterido, devido à sua produção ser mais difícil e onerosa. Entretanto, essas reservas merecem uma atenção especial, pois são atribuídos mais de 6 trilhões de barris de óleo *in place* aos hidrocarbonetos mais pesados, ou seja, o triplo da quantidade combinada das reservas convencionais de óleo e gás mundiais. Os óleos pesados são densos e viscosos, apresentando desafios especiais em sua produção, a exemplo da alta viscosidade, que é uma grande preocupação para a recuperação de reservatórios de óleo pesado. Uma das formas de atuar na viscosidade do óleo é a adoção de métodos térmicos, a exemplo do aquecimento eletromagnético, em que se transforma energia elétrica em energia térmica, aumentando a temperatura média do reservatório e reduzindo a viscosidade dos fluidos, o que contribui para aumentar a mobilidade da fase óleo. Esta pesquisa teve como objetivo o estudo da aplicação do aquecimento resistivo em um reservatório de óleo pesado, com a posterior avaliação da influência de dois parâmetros de incerteza do reservatório (saturação de água conata e salinidade da água) e dois parâmetros operacionais (nível de tensão e configuração elétrica). Adotando um tempo de projeto de 20 anos e partindo de uma configuração tomada como base, verificou-se um ganho de 121,88% na produção de óleo, quando comparada a adoção do aquecimento com a recuperação primária. Variando a salinidade da água do reservatório, também foi verificado aumento na produção, indicando que ela repercute positivamente para a aplicação do aquecimento resistivo. Através da análise de sensibilidade, verificou-se que o nível de tensão elétrica é o parâmetro mais influente para aumento do fator de recuperação. Na avaliação das interações dos parâmetros, verificou-se, em todos os intervalos de tempo avaliados, que a adoção da configuração de alimentação trifásica (uma tensão de defasagem nula e dois pares de tensões com 120° e 240°), combinada com a aplicação do nível mais elevado de tensão, em um reservatório com maior saturação de água conata e maior teor de salinidade da água, resulta na maximização do fator de recuperação. Utilizando curvas de nível e superfícies de resposta, foi possível verificar as condições operacionais que favorecem o incremento no fator de recuperação e as condições de reservatório mais adequadas, entretanto, do ponto de vista empresarial, essas informações deveriam ser complementadas por uma avaliação econômica, para que investimentos fossem eventualmente considerados.

Palavras-chave: Simulação numérica de reservatórios, aquecimento resistivo, óleo pesado, análise de sensibilidade.

ABSTRACT

In the oil industry, heavy oil has been left behind, as its production is harder and more expensive. However, those reservoirs deserve special attention, as it is believed that there are 6 trillion barrels of heavy hydrocarbons in place, that is, the triple of the world oil and gas conventional reservoirs combined. Heavy oils are dense and viscous, what represents special challenges that are not insurmountable, as the high viscosity is an example of a big concern when trying to recover heavy oil. Thermal methods are one way of acting over the oil viscosity, and electrical resistive heating (ERH) is an example of those methods, in which electrical energy is converted in thermal energy, increasing the average reservoir temperature, thus decreasing the fluids viscosity, what contributes to raise the oil phase mobility. In this context, this research aimed at studying the application of electrical resistive heating in a heavy oil reservoir, also evaluating the influence of two parameters of reservoir uncertainty (connate water saturation and water salinity), and two operational parameters (voltage level and electrical configuration). Considering 20 years as simulation time, in a basis configuration, it was reached an increasing of 121.88% in the oil recovery, when comparing it with the primary recovery. Increasing the water salinity, it was verified that it implies also in increasing the production, what indicates that it contributes positively for the ERH. Through the sensitivity analysis, it was verified that the electrical voltage is the most influent parameter to increase the recovery factor. When evaluating parameters interaction, it was verified that, for all the simulated time steps, by adopting the three phase configuration (a single phase with no standing phase angle, and two pairs of phases having 120° and 240° of standing phase angles), combined with the highest voltage level, in a reservoir with the highest connate water saturation and highest salinity level, it implies in obtaining the highest recovery factor. At the end, by using level and response surfaces, it was possible determining the operational configuration that gives the highest recovery factor and the most appropriate reservoir conditions, however, when thinking about the real investment; those pieces of information have to be complemented by economical evaluation, what was left as suggestion for a future research.

Keywords: Simulation of petroleum reservoirs, electrical resistive heating, heavy oil, sensitivity analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cálculo representativo ilustrando a transferência de calor por condução, contendo os perfis de temperatura das camadas ao redor de uma camada estreita e permeável de 10ft , que recebe todos os fluidos quentes injetados a uma temperatura de 450°F.....	7
Figura 2. Viscosidade cinemática de óleos mortos versus temperatura.	8
Figura 3. Expansões térmicas de óleos mortos calculadas com as equações de Prats.	9
Figura 4. Esquemático do aquecimento elétrico resistivo.	12
Figura 5. Diagrama comparativo dos envelopes de fase da composição original do fluido e do modelo com pseudocomponentes.....	18
Figura 6. Permeabilidades relativas ao óleo e à água, em função da saturação de água. 19	
Figura 7. Malha fornecida para aplicação do aquecimento eletromagnético.	18
Figura 8. Diagrama de localização dos eletrodos e suas respectivas tensões de operação.....	22
Figura 9. Metodologia de desenvolvimento do trabalho.	23
Figura 10. Produção acumulada de óleo na recuperação primária e com o sistema excitado por um eletrodo central de 110 VAC, considerando água de 400 ppm de concentração de NaCl no reservatório.....	26
Figura 11. Vazão instantânea de óleo na recuperação primária e com o sistema excitado por um eletrodo central de 110 VAC, considerando água de 400 ppm de concentração de NaCl no reservatório.....	26
Figura 12. Potência elétrica instantânea consumida pelo sistema de aquecimento resistivo, excitado por um eletrodo central de 110 VAC, considerando água de 400 ppm de concentração de NaCl no reservatório.	27
Figura 13. Potência elétrica instantânea consumida pelo sistema de aquecimento resistivo, excitado por um eletrodo central de 110 VAC, considerando água de 400 ppm de concentração de NaCl no reservatório.	27
Figura 14. Evolução da pressão do reservatório em decorrência do aquecimento resistivo: (a) Instante inicial; (b) Em 5 anos; (c) Em 10 anos; (d) Em 15 anos; e (e) Em 20 anos.....	28

Figura 15. Evolução da temperatura do reservatório em decorrência do aquecimento resistivo: (a) Instante inicial; (b) Em 5 anos; (c) Em 10 anos; (d) Em 15 anos; e (e) Em 20 anos.....	29
Figura 16. Evolução da viscosidade do óleo no reservatório em decorrência do aquecimento resistivo: (a) Instante inicial; (b) Em 5 anos; (c) Em 10 anos; (d) Em 15 anos; e (e) Em 20 anos.....	30
Figura 17. Produção acumulada de óleo com o sistema excitado por um eletrodo central de 110 VAC, considerando água de 400 ppm, 30.000 ppm e 250.000 ppm de concentração de NaCl no reservatório.....	31
Figura 18. Evolução do potencial elétrico no reservatório, nas vizinhanças dos poços: (a) Instante inicial; (b) Em 10 dias; (c) Em 6 meses e (d) Em 1 ano.....	32
Figura 19. Vazão instantânea de óleo com o sistema excitado por um eletrodo central de 110 VAC, considerando água de 400 ppm, 30.000 ppm e 280.000 ppm de concentração de NaCl no reservatório.....	33
Figura 20. Produção acumulada de água com o sistema excitado por um eletrodo central de 110 VAC, considerando água de 400 ppm, 30.000 ppm e 250.000 ppm de concentração de NaCl no reservatório.....	34
Figura 21. Demanda de potência do sistema excitado por um eletrodo central de 110 VAC, considerando água de 400 ppm, 30.000 ppm e 250.000 ppm de concentração de NaCl no reservatório.....	34
Figura 22. Diagrama de Pareto gerado para a análise do fator de recuperação considerando 5 anos de projeto.	38
Figura 23. Superfícies de resposta para 5 anos de projeto, com as seguintes interações: (a) nível de tensão e configuração elétrica; (b) configuração elétrica e salinidade da água; (c) nível de tensão e salinidade da água; (d) nível de tensão e saturação de água conata; (e) configuração elétrica e saturação de água conata; e (f) saturação de água conata e salinidade da água.	39
Figura 24. Diagrama de Pareto gerado para a análise do fator de recuperação considerando 10 anos de projeto.	41
Figura 25. Superfícies de resposta para 10 anos de projeto, com as seguintes interações: (a) nível de tensão e configuração elétrica; (b) configuração elétrica e teor de salinidade	

da água do reservatório; (c) nível de tensão e salinidade da água do reservatório; e (d) teor de salinidade da água do reservatório e saturação de água conata. 42

Figura 26. Diagrama de Pareto gerado para a análise do fator de recuperação considerando 15 anos de projeto. 44

Figura 27. Superfícies de resposta para 15 anos de projeto, com as seguintes interações: (a) nível de tensão e configuração elétrica; (b) nível de tensão e saturação de água conata; (c) nível de tensão e teor de salinidade da água; (d) configuração elétrica e teor de salinidade da água; (e) configuração elétrica e saturação de água conata; e (f) teor de salinidade da água e saturação de água conata. 45

Figura 28. Diagrama de Pareto gerado para a análise do fator de recuperação considerando 20 anos de projeto. 47

Figura 29. Superfícies de resposta para 15 anos de projeto, com as seguintes interações: (a) nível de tensão e configuração elétrica; (b) nível de tensão e saturação de água conata; (c) configuração elétrica e saturação de água conata; (d) nível de tensão e salinidade da água; (e) configuração elétrica e salinidade da água; e (f) salinidade da água do reservatório e saturação de água conata. 48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição do óleo e frações molares dos componentes/pseudocomponentes.....	17
Tabela 2. Características das soluções aquosas de NaCl (água do reservatório)	19
Tabela 3. Características iniciais do reservatório.	18
Tabela 4. Condutividade elétrica das rochas	19
Tabela 5. Condições operacionais utilizadas nas simulações realizadas.....	20
Tabela 6. Configurações de alimentação elétrica	21
Tabela 7. Parâmetros avaliados na análise de sensibilidade.....	22
Tabela 8. Casos avaliados e fatores de recuperação obtidos para cada simulação.....	35

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	1
1. Introdução	2
ASPECTOS TEÓRICOS.....	5
2. Aspectos Teóricos.....	6
2.1 Mecanismos da recuperação térmica	6
2.1.1 Transferência de calor (the swept of heat).....	6
2.1.2 Redução na viscosidade do óleo.....	8
2.1.3 Expansão térmica.....	9
2.1.4 Alteração na molhabilidade das rochas	9
2.2 Aquecimento eletromagnético	10
2.3 Aquecimento elétrico resistivo	11
2.4 Planejamento e otimização de experimentos	13
MATERIAIS E MÉTODOS.....	16
3. Materiais e Métodos.....	17
3.1 Modelo de fluidos	17
3.2 Características do reservatório.....	17
3.3 Características operacionais do modelo base.....	20
3.4 Parâmetros analisados.....	21
3.5 Metodologia para realização do trabalho.....	23
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	24
4. Resultados e Discussões	25
4.1 Aquecimento resistivo do modelo base	25
4.2 Comparação de resultados para diferentes salinidades.....	31
4.3 Análise de sensibilidade de alguns parâmetros no fator de recuperação, em diferentes tempos de projeto	35
4.3.1 Tempo de projeto: 5 anos	37
4.3.2 Tempo de projeto: 10 anos	40
4.3.3 Tempo de projeto: 15 anos	43

4.3.4	Tempo de projeto: 20 anos	47
CONCLUSÕES		51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		54
ANEXOS		58
Anexo I. Curvas de Resistividade de Soluções Aquosas de NaCl		59

INTRODUÇÃO

1. Introdução

Na indústria do petróleo, o óleo pesado tem sido geralmente um recurso preterido, devido à sua produção ser mais difícil e onerosa. Entretanto, essas reservas merecem uma atenção especial, pois são atribuídos mais de 6 trilhões de barris de óleo *in place* aos hidrocarbonetos mais pesados, ou seja, o triplo da quantidade combinada das reservas mundiais convencionais de óleo e gás (CURTIS *et al.*, 2002).

Enquanto o comportamento de um reservatório é determinado por fatores como porosidade, permeabilidade e pressão, serão a densidade e a viscosidade do óleo que irão determinar a abordagem que as companhias de petróleo deverão utilizar na sua produção. Os óleos pesados são densos e viscosos, apresentando desafios especiais, mas não intransponíveis, em sua produção (CURTIS *et al.*, 2002).

A alta viscosidade é uma grande preocupação para a recuperação de reservatórios de óleo pesado. Um óleo de viscosidade muito alta torna um projeto tecnicamente desafiador e provoca impacto no seu retorno financeiro (CARRIZALES, 2010). As vastas quantidades de óleo pesado e ultrapesado dominam as reservas mundiais de hidrocarbonetos, mas o óleo e o gás convencionais, por serem mais facilmente produzidos, ultrapassam essa contraparte de menor energia, em termos dos níveis atuais de produção. Muitas reservas dos hidrocarbonetos mais pesados estão à espera de novas tecnologias que os tornem em projetos economicamente viáveis (CURTIS *et al.*, 2002).

Vários processos de recuperação avançada (EOR) são utilizados para produzir óleo pesado, sendo esses métodos normalmente divididos em duas categorias: químicos e térmicos. Os processos químicos incluem a injeção de gás miscível, injeção de alcalinos ou de polímeros, que reagem quimicamente com o óleo tanto para reduzir a tensão interfacial no reservatório, como no caso da injeção de alcalinos, ou aumentar o varrido vertical, no caso da injeção de polímeros (PERASER *et al.*, 2012). Os métodos térmicos constituem a principal técnica em uso para recuperar óleos pesados e viscosos, uma vez que o aumento de temperatura reduz drasticamente a viscosidade do óleo, afinando-o e melhorando sua fluidez e mobilidade no interior do reservatório (KOVSCHEK, 2012).

Para se ter ideia do efeito do aumento da temperatura sobre a viscosidade, uma elevação de 20 para 75°C reduz a viscosidade do óleo árabe cru leve por um fator de 3, entretanto, essa redução é de fatores de 30 e 1000, respectivamente, para um óleo

pesado de 15° API, de Lloydminster, e um óleo extrapesado de 8° API, de Athabasca, ambas as cidades no Canadá (PERASER *et al.*, 2012).

Os métodos térmicos envolvem processos bem conhecidos, como é o caso da injeção de vapor (cíclica, contínua, SAGD e ES-SAGD), combustão *in situ*, e uma técnica mais recente, que consiste em aquecer o reservatório com energia elétrica (CARRIZALES, 2010).

Dentre os métodos térmicos de recuperação, o mais amplamente utilizado é a injeção de vapor no reservatório, que quando bem projetado é muito eficiente na recuperação de óleo, embora sua aplicabilidade seja limitada em muitas situações. Sahni, Kumar e Knapp (2000) listam situações em que esse método não trabalha muito bem:

1. Formações muito profundas, onde as perdas de calor no poço são significativas e o vapor atinge a formação com qualidade muito baixa;
2. Zonas de óleo delgadas, onde as perdas de calor para as formações adjacentes podem ser significativas;
3. Situações em que a geração e injeção de vapor podem ser inaceitáveis do ponto de vista ambiental (por exemplo, no Ártico) ou economicamente inviável (no espaço limitado de sondas *offshore*);
4. Formações de baixa permeabilidade, onde o fluido injetado pode ter dificuldade de penetração no reservatório;
5. Heterogeneidade do reservatório, onde caminhos de alta permeabilidade ou fraturas podem levar à erupção do fluido injetado (*breakthrough*) e reduzir o varrido.

Embora a injeção de vapor lidere em desenvolvimento e aplicação, a aplicação de energia elétrica é de interesse, por oferecer menores restrições com respeito aos candidatos para sua aplicação, quando comparada aos métodos convencionais de injeção de vapor (estimulação cíclica e contínua) (CARRIZALES, 2010). No método térmico utilizando aquecimento eletromagnético, transforma-se energia elétrica em energia térmica, aumentando a temperatura média do reservatório, reduzindo a viscosidade dos fluidos e, conseqüentemente, aumentando a mobilidade da fase óleo (SANTOS, 2010).

Nesse contexto, esse trabalho tem como objetivo o estudo da aplicação do aquecimento resistivo em um reservatório de óleo pesado, inclusive a avaliação da influência de dois parâmetros de incerteza do reservatório (saturação de água conata e

salinidade da água) e dois parâmetros operacionais (nível de tensão e configuração elétrica), na recuperação do óleo existente no reservatório.

Os próximos tópicos desta atividade estão estruturados da seguinte forma:

- Aspectos Teóricos – Capítulo dedicado à abordagem dos conceitos que nortearam a realização da atividade. Enfatiza uma visão geral sobre o aquecimento eletromagnético, com ênfase no aquecimento resistivo, e se encerra com uma visão geral sobre planejamento e otimização experimental;
- Materiais e Métodos – Apresenta descrições do reservatório e fluido modelados, com a definição dos modelos base para estudo. Também descreve os parâmetros e níveis que serão avaliados na análise de sensibilidade;
- Resultados – Descreve os resultados das simulações realizadas, indicando os modelos que serviram de referência para as comparações e finaliza enfocando as análises de sensibilidade realizadas, com comentários gerais sobre os resultados obtidos.
- Conclusões / Referências bibliográficas – Fechamento do relatório com a apresentação das conclusões obtidas em função dos experimentos realizados, bem como a menção às referências que auxiliaram nos pontos mencionados no decorrer do material.

ASPECTOS TEÓRICOS

2. Aspectos Teóricos

Esta seção apresenta o aporte teórico que serviu de alicerce para a aplicação do aquecimento resistivo ao modelo de reservatório disponibilizado para estudo.

Da Mata (1993) discorre sobre o aquecimento eletromagnético, citando a existência de quatro formas de aplicação. Seguindo essa abordagem, é apresentada uma visão geral sobre o tema, com maior enfoque no aquecimento elétrico resistivo, que foi a forma efetivamente aplicada.

Como também foi proposta a realização de uma análise de sensibilidade, este tópico também enfoca uma breve abordagem do planejamento experimental e otimização.

2.1 Mecanismos da recuperação térmica

Diferente da operação de injeção de água onde se considera que toda gota de óleo deslocado de um poro da rocha foi deslocado do reservatório por um volume equivalente da água injetada, os métodos de recuperação térmica não se baseiam no contato direto do óleo com o fluido injetado. É através da combinação da condução e convecção do calor, que essa energia varre grandes volumes do reservatório em determinadas circunstâncias, fazendo com que esse incremento de temperatura leve à combinação da redução da viscosidade e expansão térmica do óleo, bem como modificação da molhabilidade da rocha reservatório (KOVSCHEK, 2012). A seguir, serão abordados alguns desses efeitos, uma vez que contribuem para a eficiência técnica da aplicação do aquecimento eletromagnético na recuperação do óleo.

2.1.1 Transferência de calor (*the swept of heat*)

A temperatura de vapor injetado, a frente de vapor gerada pela combustão *in-situ*, bem como os gases quentes criados durante esse processo de combustão, operam com temperaturas muito maiores do que as temperaturas iniciais do reservatório. Nessas situações, o calor é deslocado no meio pelo fluxo de vapor e de gases quentes. Em termos de transferência de calor, a literatura destaca a convecção como uma forma mais

rápida de aquecimento do reservatório, quando comparada com a condução de calor em condições representativas dos processos de recuperação avançada (KOVSCSEK, 2012).

Entretanto, a transferência de calor por condução é efetiva para distribuir o calor em zonas do reservatório que não tiveram contato direto com um fluido quente. A Figura 1 mostra um exemplo para ilustrar o contraste entre as transferências de calor condutiva e convectiva. Nesse exemplo, a camada central (10 pés) é delgada e permeável, de tal forma que aceita todo o fluido injetado. Já as camadas adjacentes são consideradas delgadas e impermeáveis, de tal forma que a corrente de vapor não consegue vencer as pressões capilares e penetrar nas referidas camadas (KOVSCSEK, 2012).

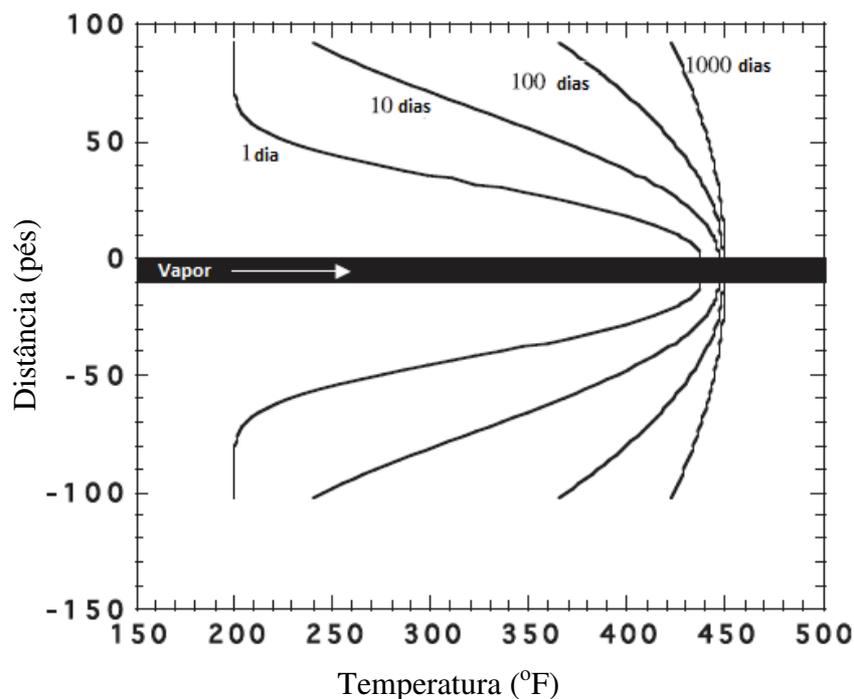


Figura 1. Cálculo representativo ilustrando a transferência de calor por condução, contendo os perfis de temperatura das camadas ao redor de uma camada estreita e permeável de 10ft , que recebe todos os fluidos quentes injetados a uma temperatura de 450°F.

Fonte: Adaptado de Koscek (2012).

Para viabilizar o exemplo, Kovscek (2012) resolveu a equação de difusividade do calor, considerando os dados informados em seu artigo, construindo a Figura 1. Ao final, observa-se que a transferência de calor por condução nas camadas adjacentes é

efetiva, na medida em que, após 100 dias, os 20 pés sobre e subjacentes são aquecidos até a temperatura do vapor. Em 1000 dias, os 200 pés de intervalo conseguem ser efetivamente aquecidos até a temperatura do vapor injetado.

2.1.2 Redução na viscosidade do óleo

É sem dúvida o mecanismo mais citado como resposta durante a aplicação dos métodos térmicos de recuperação avançada para a produção de óleo. Através da Figura 2, Koscek (2012) ressalta que um óleo morto de 10° API, a 100°F, tem uma viscosidade cinemática na faixa dos 100.000 cSt, mas que quando a temperatura é elevada de um fator de 3, a viscosidade do óleo cru é reduzida de um fator de aproximadamente 2.500. Nos casos de óleos pesados e viscosos, a redução de viscosidade devido ao aquecimento é claramente um dos grandes efeitos da temperatura. O autor também destaca que mesmo um destilado de 29,2° API sofre uma expressiva redução de viscosidade nas faixas de temperatura indicadas no gráfico.

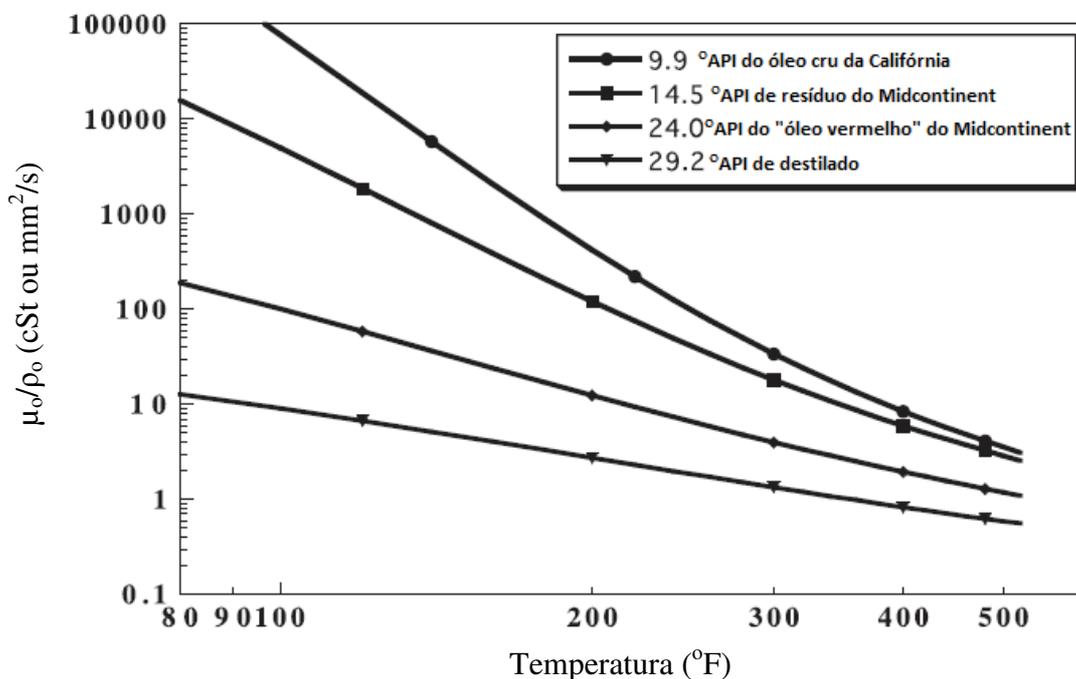


Figura 2. Viscosidade cinemática de óleos mortos versus temperatura.

Fonte: Adaptado de Koscek (2012).

2.1.3 Expansão térmica

A Figura 3 ilustra as relações entre densidade do óleo e temperatura para uma variedade de óleos mortos. As maiores reduções na densidade ocorrem para os óleos mais leves, embora mesmo o óleo de 10° API mostre alguma dependência de sua densidade com a temperatura (KOSCEK, 2012).

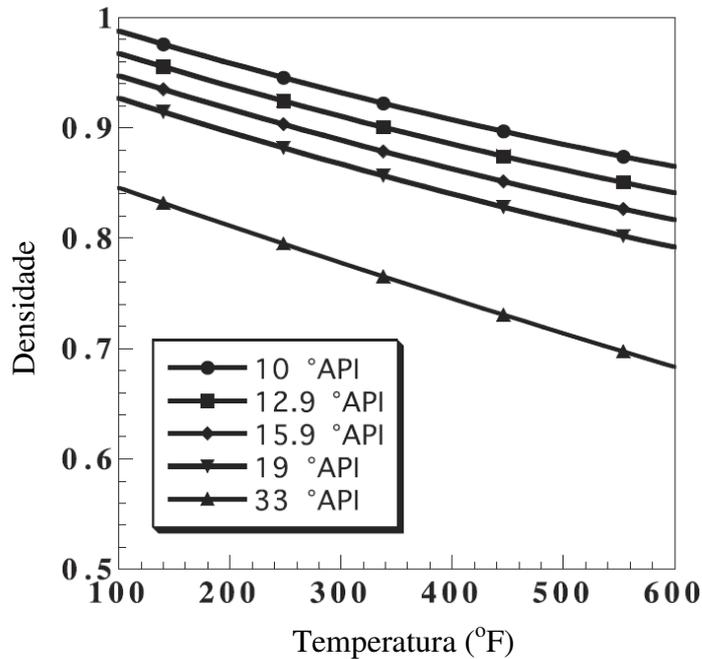


Figura 3. Expansões térmicas de óleos mortos calculadas com as equações de Prats.

Fonte: Adaptado de Koscek (2012).

Como consequência, durante os estágios iniciais da recuperação térmica, a expansão faz o volume do óleo aumentar, incrementando a energia do reservatório. Da mesma forma, para as regiões que não são varridas pelo vapor ou pelos gases aquecidos, a transferência de calor condutiva faz com que elas também sejam aquecidas e se expandam. O volume de óleo incha, fazendo com que ele seja dirigido através dos condutos permeáveis aos poços produtores (KOSCEK, 2012).

2.1.4 Alteração na molhabilidade das rochas

Alguns estudos mediram um decréscimo na saturação de óleo residual pela injeção de água quente, à medida que a temperatura foi aumentada tanto para as rochas

consolidadas como para as não consolidadas. Em uma pesquisa no arenito Berea, pesquisadores mostraram que um incremento na temperatura sempre resultou em aumento na recuperação de óleo e molhabilidade à água, independente da água ter sido introduzida em embebição espontânea ou forçada. Um experimento semelhante nos carbonatos do mar do Norte apresentou comportamento semelhante (KOSCEK, 2012).

Vários mecanismos têm sido estudados como causa desse efeito, mais é provável que mais de um mecanismo seja responsável por esse efeito. Independente do mecanismo, um acréscimo na molhabilidade à água tem impacto significativo para os métodos de injeção de vapor e de embebição por água quente, uma vez que a mobilidade da água diminui, em consequência do decréscimo da permeabilidade relativa à água, com a elevação da molhabilidade das rochas à água (KOSCEK, 2012).

2.2 Aquecimento eletromagnético

Os métodos de aquecimento eletromagnético consistem na conversão de energia elétrica em calor nas formações, através da combinação do aquecimento da resistência elétrica do meio e da absorção de potência eletromagnética, dependendo da frequência da potência elétrica utilizada. Esse calor fornecido às formações provoca a redução da viscosidade, facilitando o escoamento do óleo e o aumento da produção. Como nas demais aplicações de aquecimento elétrico, o tipo de aquecimento do reservatório vai depender da ampla faixa de frequências disponível no espectro de frequências elétricas, que podem ser usadas em diversos esquemas de aquecimento (CARRIZALES, 2010).

Segundo Hascakir, Babadagli e Akin (2008), as ferramentas de aquecimento elétrico e suas aplicações podem ser divididas em três categorias, que levam em consideração a frequência da corrente elétrica utilizada: (1) as correntes de baixa frequência são utilizadas no aquecimento resistivo/Ôhmico; (2) as correntes de alta frequência são utilizadas nos métodos de aquecimento por microondas; e (3) as ferramentas de indução têm a capacidade de utilizar uma ampla faixa de correntes de frequências baixas a médias, dependendo dos requisitos de aquecimento e da temperatura desejada.

Independente da frequência aplicada, uma onda eletromagnética é irradiada dos eletrodos para a formação, que à medida que se propaga, encontra resistência devido aos fluidos e outros materiais existentes no meio poroso. Devido a esse efeito, a intensidade

de sua propagação é reduzida e sua energia é convertida em calor. O tipo de resistência irá depender da frequência da onda, sendo o aquecimento resistivo dominante para as baixas frequências e o aquecimento dielétrico para as altas frequências (HASCAKIR; BABADAGLI; AKIN, 2008).

Nas altas frequências (frequências de rádio e microondas), o aquecimento dielétrico prevalece, uma vez que os dipolos formados pelas moléculas tendem a se alinhar com o campo elétrico aplicado, e a alternância do campo induz um movimento de rotação nesses dipolos, com uma velocidade proporcional à frequência aplicada. O movimento dessas moléculas pode resultar em um aquecimento significativo, da mesma forma que acontece no forno de microondas. Nas baixas frequências, o tipo de aquecimento predominante é o resistivo ou ôhmico (I^2R). No caso do aquecimento indutivo, enquanto a corrente alternada está circulando em um conjunto de condutores, um campo magnético é induzido no meio ao seu redor, de tal maneira que a variação desse campo irá induzir correntes secundárias, cuja circulação no meio irá gerar calor (OGLU, 2007).

Embora a literatura cite essas três formas de aquecimento, este trabalho terá como enfoque apenas o aquecimento resistivo, que será tratado a seguir.

2.3 Aquecimento elétrico resistivo

Mata (1993) se refere a esse método como aquecimento por condução, explicando que a formação que contém o fluido viscoso é atravessada por uma corrente elétrica que surge entre dois condutores com diferentes potenciais, posicionados em poços vizinhos e em frente à zona produtiva ou entre quaisquer dois pontos. Nessa situação, a formação é aquecida pelo efeito Joule.

O aquecimento elétrico de baixa frequência ou resistivo é produzido pela passagem de corrente elétrica através de uma resistência, uma vez que obstáculos ao fluxo de corrente causam dissipação (liberação de calor). O grau de aquecimento para uma dada corrente é proporcional à resistência elétrica do condutor, de tal forma que, sendo a resistência alta, uma grande quantidade de calor é gerada e o material é utilizado como um resistor, ao invés de condutor (OGLU, 2007).

O aquecimento elétrico resistivo faz uso da resistência elétrica natural da subsuperfície, onde a energia é dissipada. Essa forma de aquecimento *in situ* permite

que a energia seja focada em uma zona específica, que quando atinge o ponto de bolha da água dos poros, resulta na geração de vapor *in situ*. A resistividade da matriz de subsuperfície é determinada pelo seu conteúdo de água, concentração de sais dissolvidos ou conteúdo iônico na água, e a capacidade de troca de íons do próprio solo. A resistividade é uma função da temperatura, e à medida que a água atinge seu ponto de bolha, a resistividade diminui, devido ao aumento da mobilidade dos íons (OGLU, 2007).

Em um sistema de aquecimento elétrico resistivo, a resistência total pode ser determinada com base na resistividade das rochas e na geometria do sistema de eletrodos. A resistência das rochas pode ser medida no campo ou estimada a partir de dados de caracterização das rochas e da água subterrânea. Para matrizes com uma resistência total de 10 até poucas centenas de ohms, e faixas de tensão aplicada de 100 a 1.500 volts, a potência necessária de entrada será da ordem de dezenas ou centenas de quilowatts (OGLU, 2007).

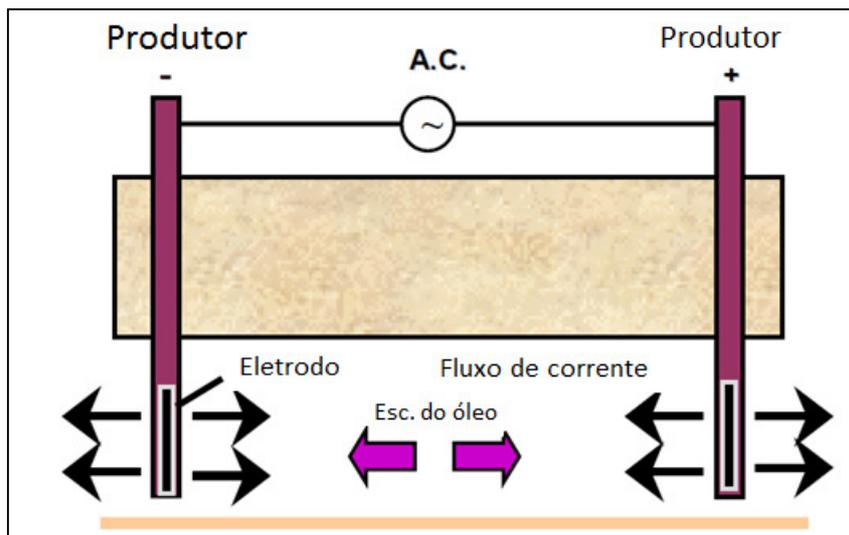


Figura 4. Esquemático do aquecimento elétrico resistivo.

Fonte: Adaptado de Sahni e Kumar (2000).

Os principais componentes de um sistema de aquecimento resistivo são (SIERRA *et al.*, 2001):

1. Conjunto de eletrodos – consistem em segmentos de coluna e juntas de isolamento, pré-projetadas utilizando estudos de otimização de potência-vazão, baseados nas características do reservatório;
2. Unidade de condicionamento de potência (geralmente 480 V, 50/60 Hz) – que fornece os meios para modificar a linha e tornar a potência adequada para a

entrega ao reservatório. Uma faixa de frequências pode ser produzida para otimizar o consumo de energia e a eficiência de entrega. As unidades típicas de condicionamento de potência são disponibilizadas em módulos de 100 kW, podendo ser conectadas em paralelo ou série, para satisfazer aos diferentes requisitos de carga das aplicações.

3. Sistema de entrega de potência – consiste de uma coluna, cabos ou combinação de ambos. Esse sistema essencial fornece meios de transmitir a potência de maneira eficiente e segura;
4. Sistema de aterramento – projetado para regular o fluxo de energia no reservatório;
5. Sistema de monitoramento/gravação – disponibiliza hardware e software para controle manual ou automático e monitoramento da potência e temperaturas através dos sensores montados nos sistemas.

Nesse sistema, a corrente viaja a partir da unidade de condicionamento de potência e através do sistema de entrega de potência, para o conjunto de eletrodos, sendo forçada através da matriz do reservatório, retornando à unidade de condicionamento de potência através do sistema de aterramento (SIERRA *et al.*, 2001).

2.4 Planejamento e otimização de experimentos

O planejamento experimental, com base em fundamentos estatísticos, consiste em uma ferramenta poderosa para se alcançar condições otimizadas em um processo, desenvolvimento da formulação de produtos dentro de especificações desejadas ou simplesmente avaliar os efeitos ou impactos que os fatores têm nas respostas desejadas (RODRIGUES; IEMMA, 2005). Ele representa um conjunto de ensaios, estabelecido com base em critérios científicos e estatísticos, tendo como objetivo a determinação da influência de diversas variáveis nos resultados de um dado sistema ou processo (MEDEIROS, 2012).

Segundo Barros Neto, Scarminio e Bruns (1996, p.17), “a essência de um bom planejamento consiste em projetar um experimento de forma que ele seja capaz de fornecer exatamente o tipo de informação que procuramos. Para isso precisamos saber o que é que estamos procurando”. Para esses autores, a definição clara dos objetivos a serem alcançados vai auxiliar na escolha das técnicas de planejamento mais adequadas

para o problema tratado, uma vez que algumas deles serão mais vantajosas, ao passo que outras serão inócuas na abordagem da questão.

Através de planejamentos experimentais baseados em princípios estatísticos, é possível extrair do sistema em estudo o máximo de informação útil, realizando uma quantidade mínima de experimentos (MARINHO; CASTRO, 2005).

Já os métodos de otimização surgiram em função da necessidade de aprimoramento do desempenho dos mais diversos sistemas do cotidiano. “Otimizar” é buscar tornar algo tão perfeito, efetivo e funcional quanto possível. Quando aplicado esse conceito aos processos, pode-se ter em mente a possibilidade de definir sequências operacionais que permitam a obtenção dos melhores resultados para determinadas situações (MEDEIROS, 2012).

Medeiros (2012, p.31), destaca como benefícios da aplicação de técnicas estatísticas de planejamento experimental:

- Redução do número de ensaios sem prejuízo da qualidade da informação;
- Estudo simultâneo de diversas variáveis, separando seus efeitos;
- Determinação da confiabilidade dos resultados;
- Realização da pesquisa em etapas, num processo iterativo de acréscimo para novos ensaios;
- Seleção das variáveis que influenciam num processo com número reduzido de ensaios;
- Representação do processo estudado através de expressões matemáticas;
- Elaboração de conclusões a partir de resultados qualitativos.

Esse processo de otimização pode ser realizado através da elaboração de superfícies de resposta, pois elas possibilitam a investigação de regiões ótimas de operação (ARAÚJO, 2012). Para Calado e Montgomery (2003), as superfícies de resposta são utilizadas quando as variáveis de resposta são influenciadas por muitas variáveis independentes e o objetivo é a otimização dessas respostas. A superfície de resposta geralmente mostra uma figura tridimensional que facilita a visualização da resposta do sistema (ANTONY, 2003).

De uma maneira geral, as superfícies de resposta e curvas de nível são úteis para a verificação dos valores mais adequados de resposta e condições operacionais, sendo a curva de nível uma superfície de resposta bidimensional, onde todos os pontos que

possuem a mesma resposta são conectados para produzir linhas de contorno de resposta constante (ANTONY, 2003).

MATERIAIS E MÉTODOS

3. Materiais e Métodos

Esta seção trata das premissas de modelagem adotadas, apresentando a especificação dos modelos de fluidos, reservatório, modelo base e parâmetros avaliados neste trabalho.

3.1 Modelo de fluidos

Neste trabalho foi utilizado um modelo de óleo composicional, que inicialmente possuía 41 componentes, sendo dois inertes (CO₂ e N₂), trinta e nove hidrocarbonetos (C1 a C39) e um pseudocomponente (C40+). Como o número de componentes era muito elevado, para otimizar o tempo de simulação, foi realizado um processo de pseudoização para agrupamento de parte desses componentes em pseudocomponentes, resultando no modelo mostrado na Tabela 1. A Figura 5 também mostra os envelopes de fases gerados para a composição original e para a composição reduzida com a criação dos pseudocomponentes, ilustrando a similaridade.

Tabela 1. Composição do óleo e frações molares dos componentes/pseudocomponentes.

Componente	Fração Molar (%)
CO ₂	0,4512
N ₂	0,2707
C1 a C3	10,3891
C4 a C5	0,3209
C6 a C10	0,3810
C11 a C20	20,3125
C21 a C39	42,4876
C40+	25,3867

3.2 Características do reservatório

O reservatório de petróleo modelado para a realização dos experimentos possui algumas características semelhantes às das bacias sedimentares do Nordeste Brasileiro, foi considerado homogêneo, com área de 40.000 m² (200m x 200m), com 20m de espessura na zona de óleo, 10m de espessura na zona de água, sem capa de gás, conforme ilustrado na Figura 6. Os demais parâmetros do reservatório estão mostrados na Tabela 2.

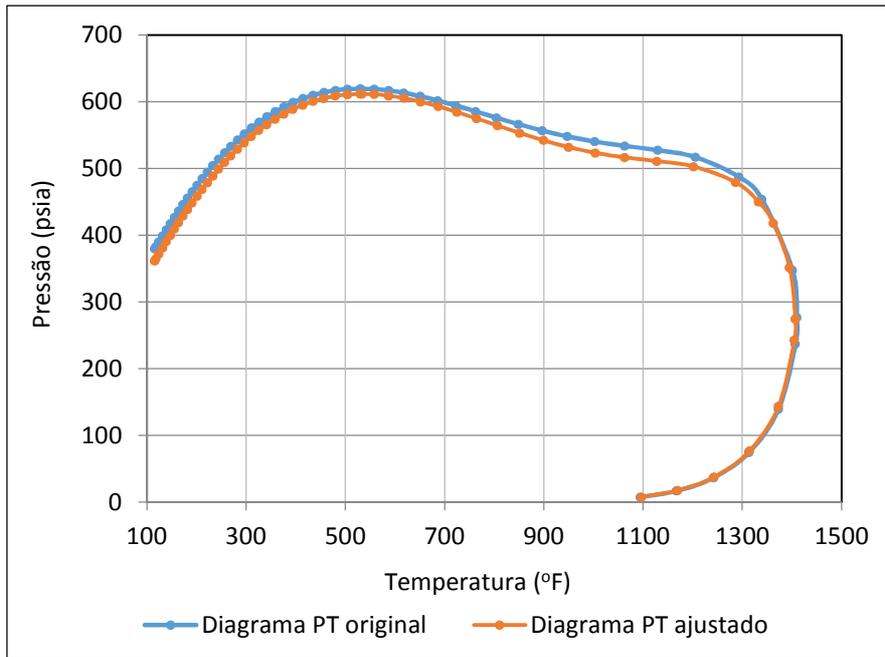


Figura 5. Diagrama comparativo dos envelopes de fase da composição original do fluido e do modelo com pseudocomponentes.

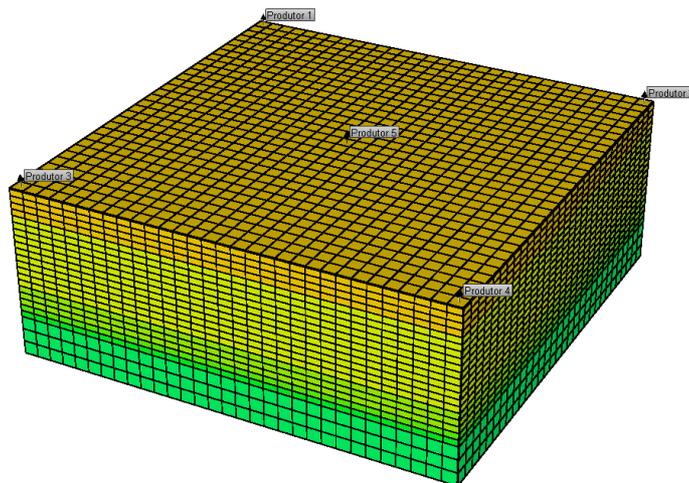


Figura 6. Malha fornecida para aplicação do aquecimento eletromagnético.

Tabela 2. Características iniciais do reservatório.

Características Iniciais	Valor
Profundidade de referência (m)	200
Pressão a 200m (psi)	287
Porosidade (%)	25
Permeabilidade horizontal (mD)	1.000
Permeabilidade vertical (mD)	100
Saturação de água conata (%)	30
Óleo <i>in place</i> (m ³ STD)	107.060
Condutividade térmica das camadas sobrejacentes e subjacentes (J/m-s-°C)	7,24.10 ⁵
Temperatura inicial (°C)	38

As permeabilidades relativas à água e ao óleo, na temperatura de reservatório e considerando a saturação inicial de água conata em 30%, são mostradas na Figura 7 e a condutividade elétrica da formação na Tabela 3.

Para a água do reservatório, foram consideradas três salinidades distintas: 400 ppm, 30.000 ppm e 250.000 ppm. No modelo, essas soluções aquosas de NaCl foram representadas através de suas condutividades, apresentadas na Tabela 4, obtidas a partir de pontos das curvas de resistividade de soluções aquosas de NaCl, apresentadas no Anexo I.

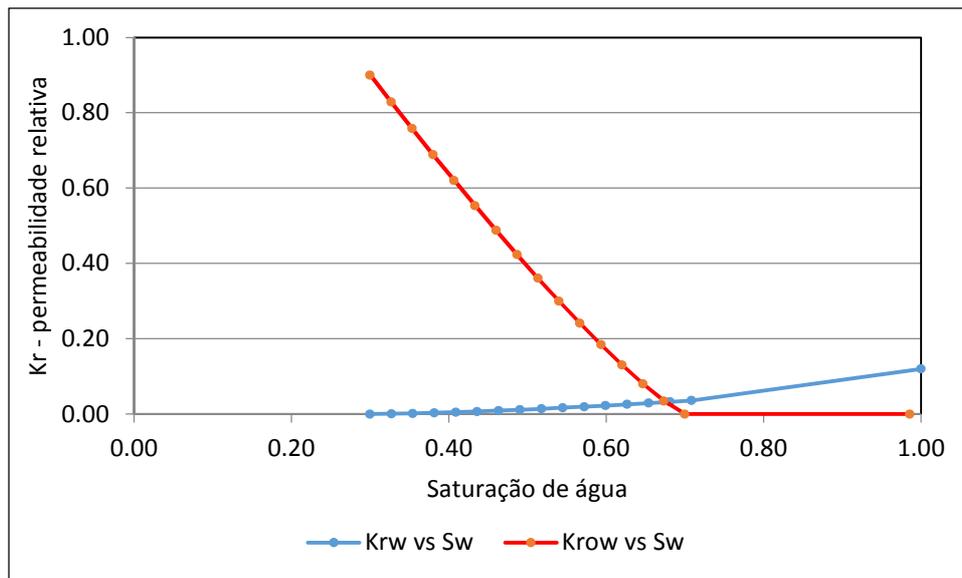


Figura 7. Permeabilidades relativas ao óleo e à água, em função da saturação de água.

Tabela 3. Condutividade elétrica das rochas

Temperaturas (°F)	Condutividade (S/m)
100	0,60
200	0,65
300	0,70
400	0,75

Tabela 4. Características das soluções aquosas de NaCl (água do reservatório)

Temperaturas (°F)	400 ppm		30.000 ppm		250.000 ppm	
	Resist. (Ω.m)	Condut. (S/m)	Resist. (Ω.m)	Condut. (S/m)	Resist. (Ω.m)	Condut. (S/m)
100	9,5	0,105263	0,160	6,25	0,0340	29,41
200	4,6	0,217391	0,080	12,50	0,0174	57,47
300	3,0	0,333333	0,055	18,18	0,0123	81,30
400	2,2	0,454545	0,044	22,73	0,0100	100,00

3.3 Características operacionais do modelo base

Os principais parâmetros operacionais utilizados nas simulações são mostrados na Tabela 5. O valor de tensão nos eletrodos não é citado na tabela, mas os testes iniciais foram realizados utilizando 110 VAC, que é um nível de tensão comercializado em alguns Estados, em uma configuração onde o eletrodo estava energizado no poço central e os poços periféricos continham eletrodos aterrados. As demais configurações de tensão aplicadas no sistema serão detalhadas na etapa de planejamento de experimentos.

Tabela 5. Condições operacionais utilizadas nas simulações realizadas

Condições Operacionais	Valor
Vazão máxima de produção de líquidos nos poços (m ³ /dia)	500,00
Pressão mínima nos poços produtores (psi)	28,33
Distância entre poços (m)	136,83
Comprimento dos eletrodos (m)	10
Região completada (direção $-\hat{k}$)	1:10
Máxima demanda admissível de potência elétrica (kW)	5.000

A distância entre poços foi calculada tomando o poço central como referência e a distância do seu centro até o centro de cada poço periférico, estando os quatro situados à mesma distância do poço central. Na configuração utilizada, todos os poços são verticais, produtores, com os eletrodos posicionados internamente, ao longo de cada um daqueles poços. Oliveira (2009), testando uma malha semelhante, utilizou três tipos de completações, sendo uma delas no topo, outra no centro e a terceira na região inferior do reservatório. Ele concluiu que, em termos de fator de recuperação do óleo, as completações no topo e no centro apresentaram bons resultados, razão pela qual foi adotada a completação dos blocos 1 ao 10, na direção $-\hat{k}$, que correspondia à completação de topo utilizada pelo referido pesquisador.

O modelo que pode ser considerado base para esse estudo continha água no reservatório com 400 ppm de salinidade; o arranjo de poços mostrado na Figura 6, do tipo *five-spot*, embora os cinco poços sejam produtores; e cinco eletrodos, estando cada um deles em um dos poços produtores, com o eletrodo central excitado a uma tensão monofásica de 110 VAC (60Hz) e os eletrodos periféricos operando com o potencial da terra, para fechamento dos circuitos.

3.4 Parâmetros analisados

Neste trabalho foi estudada a sensibilidade do fator de recuperação de óleo à variação de dois parâmetros de reservatório e dois parâmetros operacionais. É importante ressaltar que o maior fator de recuperação não implica necessariamente em maior volume de óleo produzido, uma vez que o incremento na saturação de água conata resulta em redução no volume de óleo do reservatório, considerando o reservatório com volume poroso constante.

Para viabilizar o estudo, foi realizado um planejamento fatorial do tipo 3^4 , que considerava os quatro parâmetros, com cada um deles variando em três níveis, o que resultou em 81 casos de estudo. Cada um desses casos gerou um novo modelo, que depois de simulado, teve seus resultados incorporados em um programa estatístico para avaliação.

Os parâmetros de reservatório analisados foram a saturação de água conata e a salinidade da água do reservatório, cuja variação interfere em sua condutividade elétrica, com impacto direto no fluxo de corrente no interior do reservatório. Os valores de salinidade da água adotados foram os mesmos já apresentados na Tabela 4, que também apresenta os valores de condutividade elétrica para cada uma delas. Já os parâmetros operacionais analisados foram os níveis de tensão aplicados nos eletrodos e configurações de alimentação dessas tensões, que consideravam combinações envolvendo as fases e o neutro de um sistema trifásico.

Em seu trabalho, dentre as várias possibilidades de configuração de alimentação das tensões em um sistema trifásico, Oliveira (2009) avaliou cinco delas, dentre as quais escolheu três para realizar a análise de sensibilidade. Foram as configurações apontadas por Oliveira (2009) que foram testadas neste trabalho, mostradas na Tabela 6, cuja compreensão é facilitada pela Figura 8. Já os níveis de tensão testados foram 55 VAC, 82,5 VAC e 110 VAC, cuja proposição original também foi de Oliveira (2009).

Tabela 6. Configurações de alimentação elétrica

Configuração	Eletrodo 1	Eletrodo 2	Eletrodo 3	Eletrodo 4	Eletrodo 5
Geral	$V_1 \angle \theta_1$	$V_2 \angle \theta_2$	$V_3 \angle \theta_3$	$V_4 \angle \theta_4$	$V_5 \angle \theta_5$
A	0	0	0	0	$V \angle 0^\circ$
B	$V \angle 120^\circ$	$V \angle 120^\circ$	$V \angle 240^\circ$	$V \angle 240^\circ$	$V \angle 0^\circ$
C	$V \angle 0^\circ$	$V \angle 120^\circ$	$V \angle 120^\circ$	$V \angle 0^\circ$	$V \angle 0^\circ$

Fonte: Adaptado de Oliveira (2009)

Em todas as configurações mostradas na Tabela 6, a amplitude da tensão foi mantida constante, variando-se apenas o valor da fase. Assim, os parâmetros analisados são resumidos na Tabela 7.

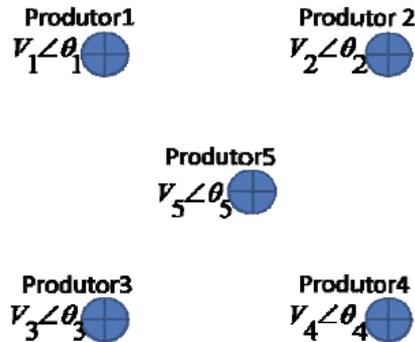


Figura 8. Diagrama de localização dos eletrodos e suas respectivas tensões de operação.

Fonte: Oliveira (2009, p.32).

Tabela 7. Parâmetros avaliados na análise de sensibilidade

Parâmetros	-1	0	+1
Saturação de água conata	20%	30%	40%
Salinidade da água	400 ppm	30.000 ppm	250.000 ppm
Configuração elétrica	A	B	C
Nível de tensão	55 VAC	82,5 VAC	110 VAC

As simulações também levaram em consideração o efeito que essas salinidades provocaram na viscosidade da água do interior do reservatório, embora o simulador da CMG apresente uma limitação, podendo considerar viscosidades em soluções de até 260.000 ppm, razão pela qual o nível máximo de viscosidade testado foi de 250.000 ppm.

3.5 Metodologia para realização do trabalho

A Figura 9 apresenta um diagrama ilustrativo da metodologia empregada para desenvolvimento deste trabalho:

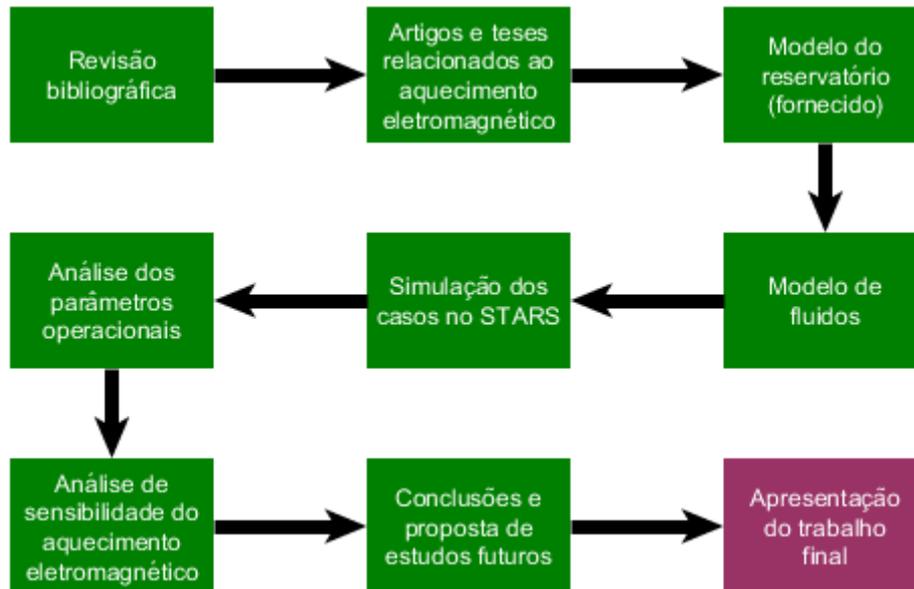


Figura 9. Metodologia de desenvolvimento do trabalho.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4. Resultados e Discussões

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos nas simulações realizadas, levando em consideração, inicialmente, a recuperação primária no modelo base e em suas variantes que consideram diferentes salinidades na água do reservatório. Na sequência, os resultados obtidos em função da realização do planejamento experimental.

4.1 Aquecimento resistivo do modelo base

Considerando as três concentrações de sal adotadas para análise, foram realizadas outras simulações adotando a mesma malha *five-spot*, com um eletrodo em cada poço produtor. Nessa configuração base, apenas o eletrodo central foi excitado com uma tensão de 110 VAC, que é um dos patamares de tensão comercializados pelas empresas distribuidoras locais no Sul e Sudeste do país, enquanto os eletrodos periféricos foram aterrados. Nesse sistema, a potência máxima fornecida foi limitada em 5.000 kW, que embora seja um nível muito elevado, permite que sejam observados limites operacionais.

Para os mesmos tipos de análises mostradas anteriormente, a comparação foi realizada entre os modelos com recuperação primária e com a adoção do eletrodo, considerando uma salinidade da água de 400 ppm e o reservatório com uma saturação de 30% de água conata.

Para a produção acumulada de óleo (Figura 10), foi observado um aumento de 121,88 p.p. na produção, que passou de 28.476 m³ STD, na recuperação primária, para 63.183 m³ STD, adotando a configuração *five-spot*, com excitação de 110 VAC no eletrodo central. Esse aumento na produção ocorre porque a condução de corrente entre os eletrodos aquece os fluidos do reservatório, o que provoca redução na viscosidade do óleo e facilita o seu escoamento.

A Figura 11 mostra que o aquecimento resistivo também leva a um aumento na vazão de óleo do sistema, o que justifica a elevação na produção acumulada de óleo já comentada anteriormente e que, ao final de 20 anos, começa a se aproximar do ritmo de produção que o sistema apresentava quando adotada apenas a recuperação primária.

Adicionalmente, é importante verificar a potência instantânea demandada pelo sistema de aquecimento resistivo (Figura 12), pois ela é uma das características mais

importantes no momento do projeto físico desse tipo de sistema, determinando a sua viabilidade técnica e indicando a capacidade que o gerador de potência deveria possuir para suportar o sistema. No horizonte de 20 anos, para o modelo base analisado, a maior demanda de potência acontece no final do período estudado, que é de 117,77 kW. Nesse sistema, o consumo de energia em função do tempo é mostrado na Figura 13, onde é possível verificar que alcança um montante de $19,14 \cdot 10^6$ kW-h. Essa última informação é muito importante para avaliar a viabilidade econômica dessa aplicação.

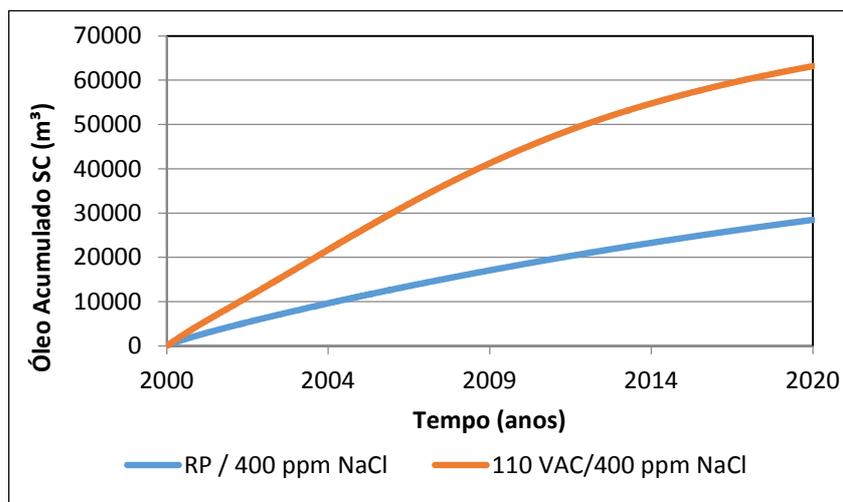


Figura 10. Produção acumulada de óleo na recuperação primária e com o sistema excitado por um eletrodo central de 110 VAC, considerando água de 400 ppm de concentração de NaCl no reservatório.

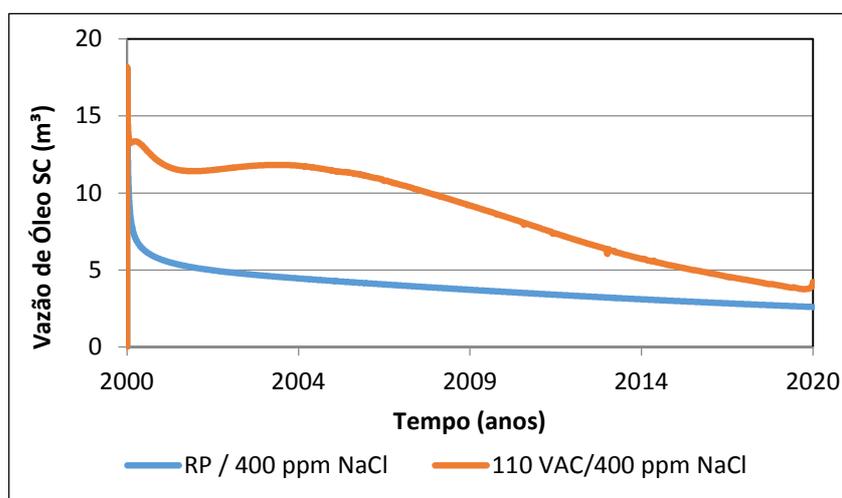


Figura 11. Vazão instantânea de óleo na recuperação primária e com o sistema excitado por um eletrodo central de 110 VAC, considerando água de 400 ppm de concentração de NaCl no reservatório.

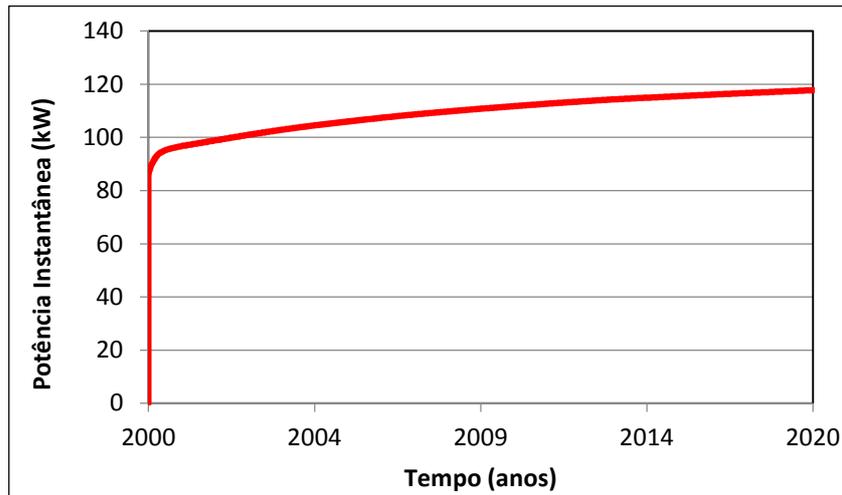


Figura 12. Potência elétrica instantânea consumida pelo sistema de aquecimento resistivo, excitado por um eletrodo central de 110 VAC, considerando água de 400 ppm de concentração de NaCl no reservatório.

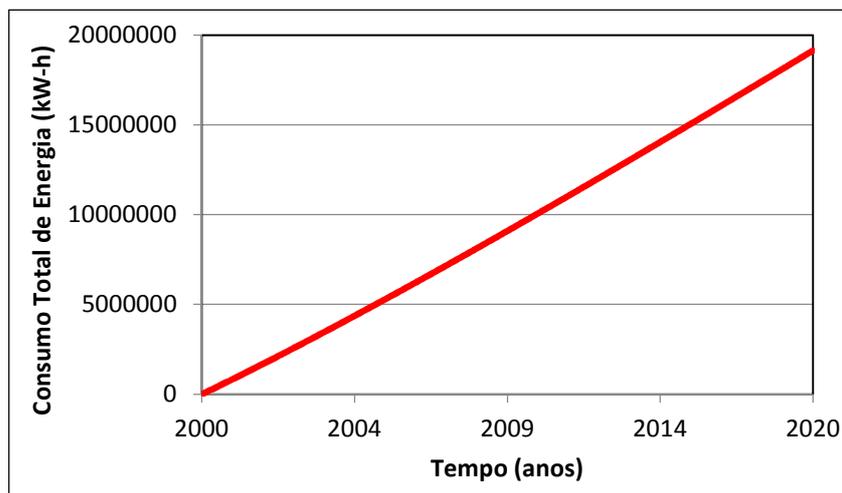


Figura 13. Potência elétrica instantânea consumida pelo sistema de aquecimento resistivo, excitado por um eletrodo central de 110 VAC, considerando água de 400 ppm de concentração de NaCl no reservatório.

A Figura 14 mostra a depleção do reservatório com a introdução do aquecimento resistivo. Nesse caso, a pressão média do reservatório passou de 302,5 psi, no instante inicial, para 56,4 psi, ao final do tempo de simulação. Em relação à pressão média final na recuperação primária, de 154,43 psi, esse novo valor representa 36,52% da pressão média final alcançada quando o reservatório produzia apenas com a recuperação primária.

Segundo Kovsky (2012), a aplicação da recuperação térmica é bem sucedida devido a múltiplos mecanismos que aperfeiçoam a recuperação do óleo, a exemplo da

redução da viscosidade, alteração da molhabilidade, e expansão térmica. Ainda segundo esse autor, a transferência de calor varre porções do reservatório que nunca entram em contato direto com material injetado, a exemplo de vapor ou ar, o que também contribui para o aumento da recuperação. No caso analisado, o resultado desses efeitos é o aumento na remoção da massa do interior do reservatório, o que implica na maior redução de pressão que foi observada.

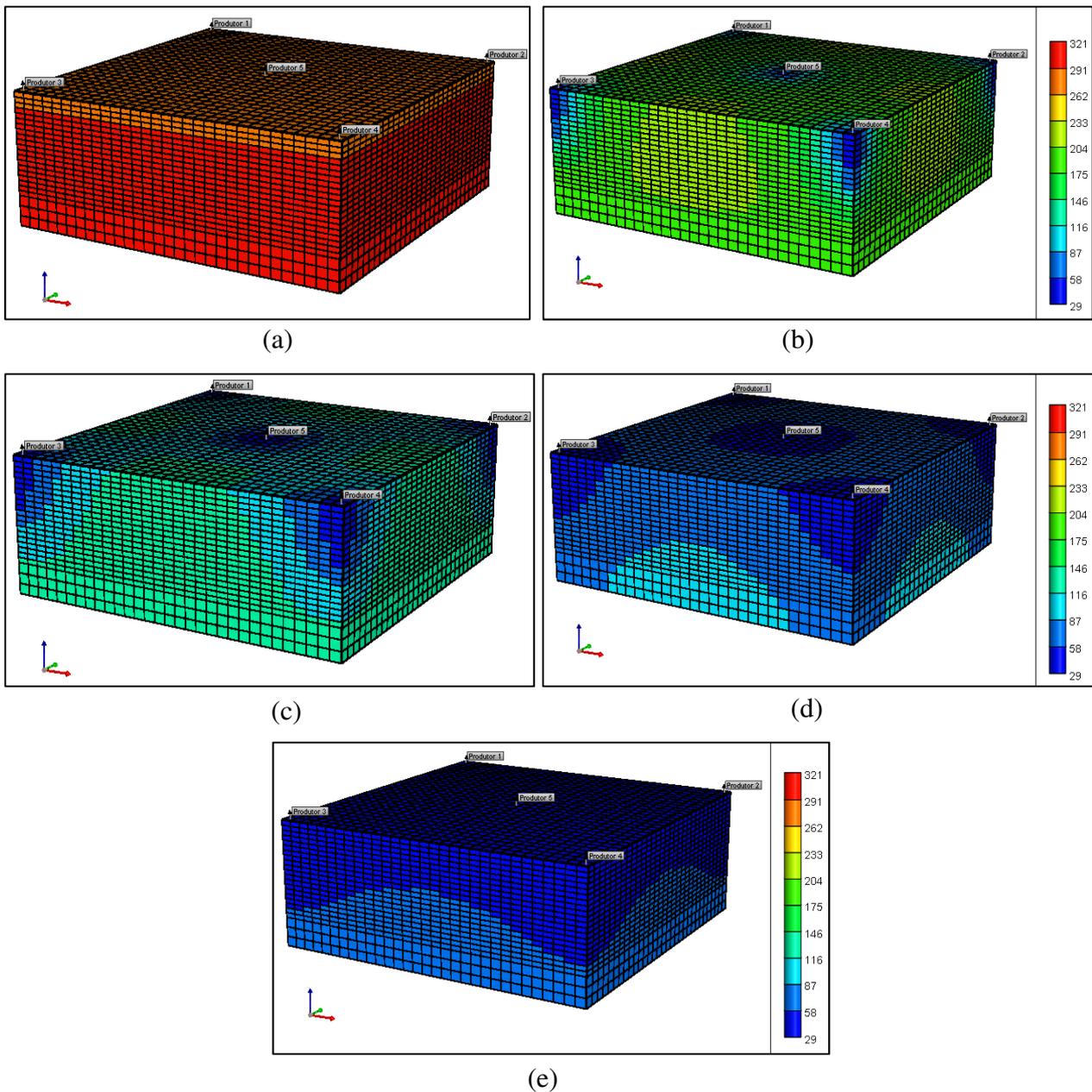


Figura 14. Evolução da pressão do reservatório em decorrência do aquecimento resistivo: (a) Instante inicial; (b) Em 5 anos; (c) Em 10 anos; (d) Em 15 anos; e (e) Em 20 anos.

No aquecimento resistivo, a elevação da temperatura é maior nas proximidades dos eletrodos, conforme pode ser observado na Figura 15. A temperatura média inicial é de 100,4 °F e passa a 114,2 °F após 20 anos de projeto, embora alcance um máximo de 433,9 °F nas proximidades do eletrodo central, que emite a corrente total, que se divide para os demais eletrodos.

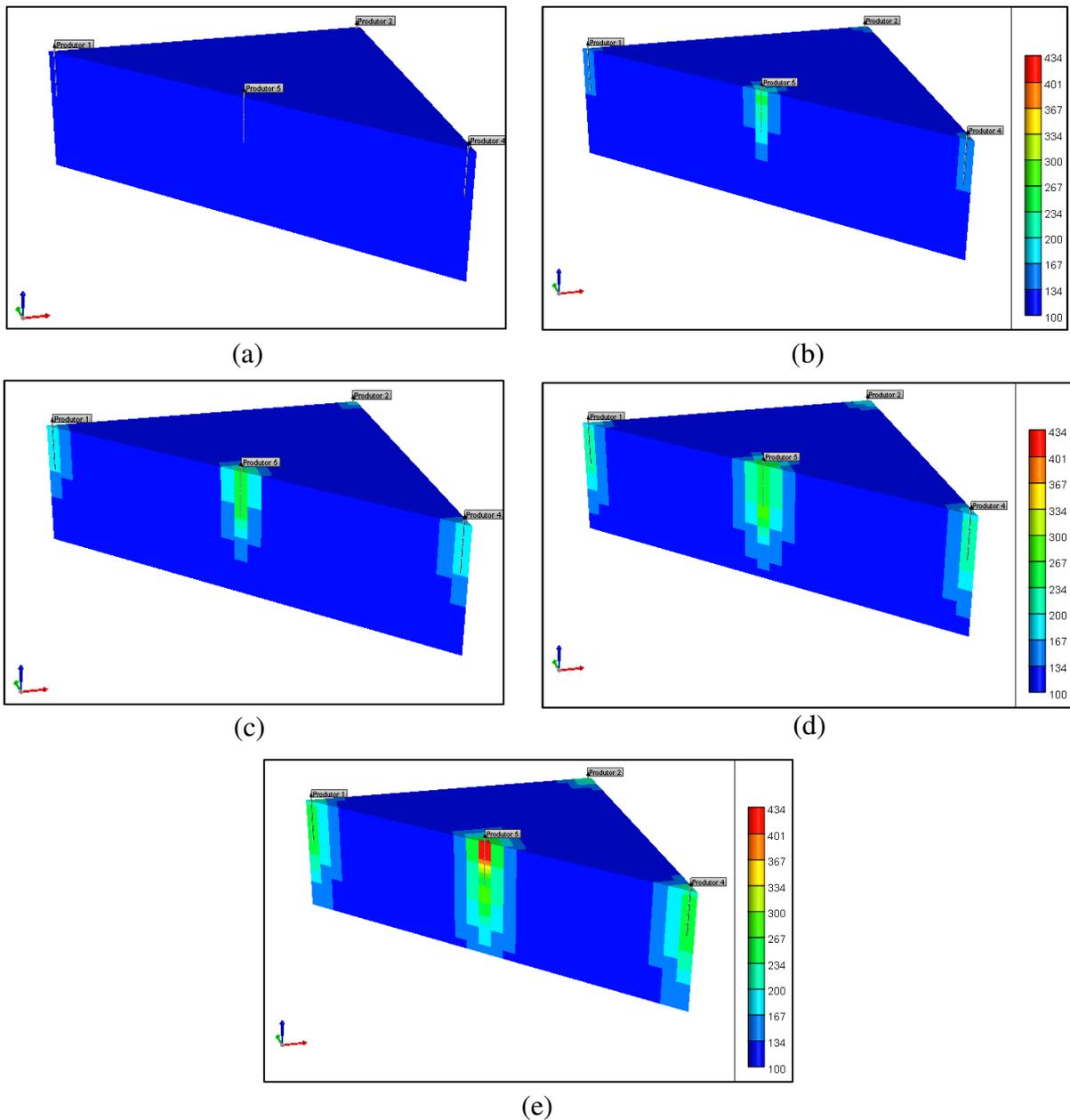


Figura 15. Evolução da temperatura do reservatório em decorrência do aquecimento resistivo: (a) Instante inicial; (b) Em 5 anos; (c) Em 10 anos; (d) Em 15 anos; e (e) Em 20 anos.

Em termos da viscosidade do óleo, como o aquecimento resistivo eleva a temperatura nas proximidades dos eletrodos, a Figura 16 mostra que o óleo se torna menos viscoso justamente nesses pontos. À medida que o tempo de simulação aumenta, a região de redução de viscosidade vai aumentando, mas sempre nas proximidades dos eletrodos. Inicialmente, a viscosidade média do óleo é de 732,6 cP, mas chega a ser reduzida a 489,38 cP, como consequência da aplicação desse método. Na região próxima ao ponto de temperatura mais alta, a viscosidade chega a alcançar um mínimo de 1,95 cP.

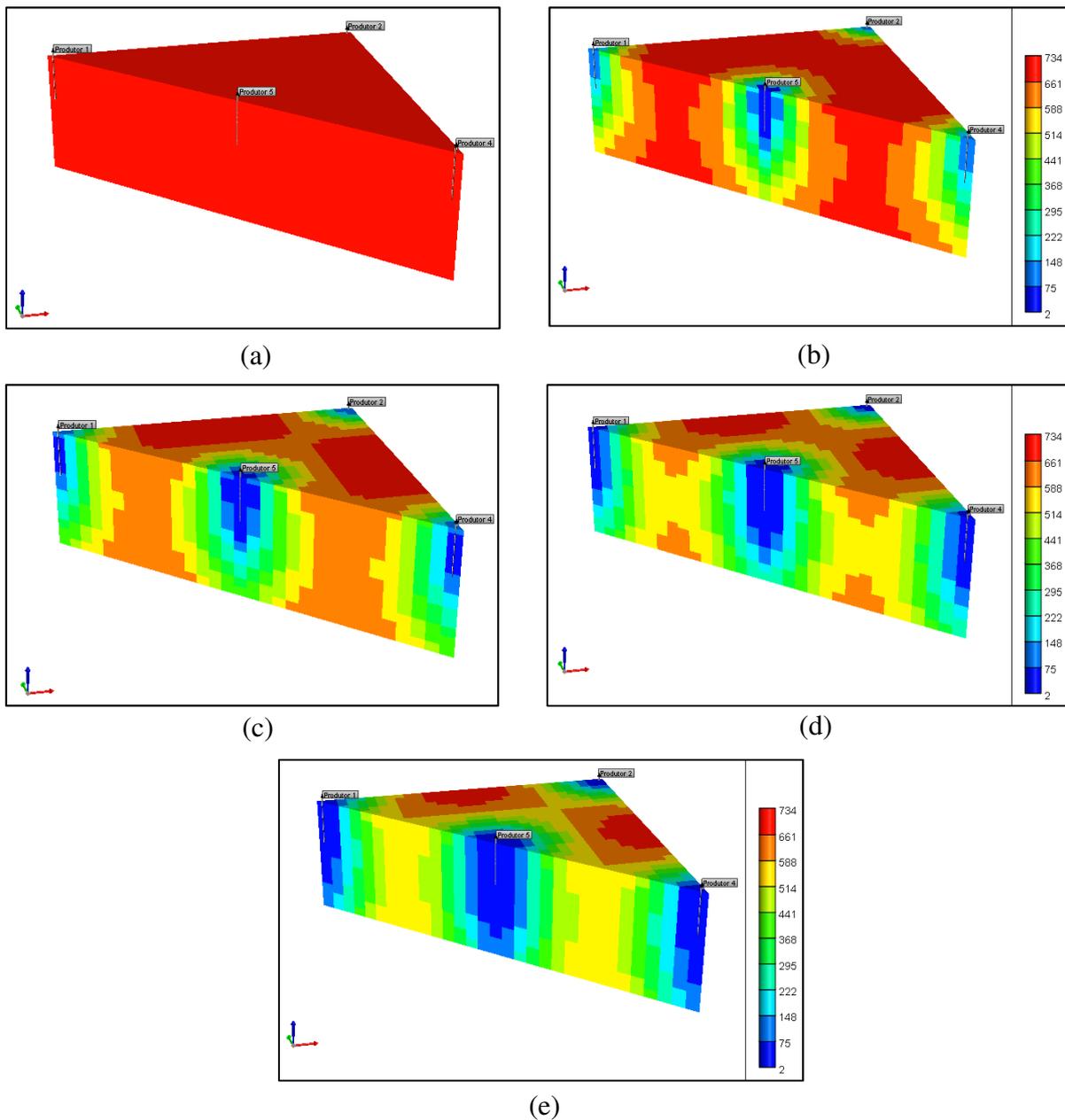


Figura 16. Evolução da viscosidade do óleo no reservatório em decorrência do aquecimento resistivo: (a) Instante inicial; (b) Em 5 anos; (c) Em 10 anos; (d) Em 15 anos; e (e) Em 20 anos.

Ainda na Figura 16, observa-se que o óleo que fica entre os eletrodos aterrados não sofre efeito do método, pois a corrente flui diretamente entre o eletrodo central e os aterramentos das pontas da malha. Especificamente nesse caso, haveria a necessidade de adotar um método adicional para buscar deslocar esse óleo retido.

4.2 Comparação de resultados para diferentes salinidades

Foi realizada uma avaliação da resposta do reservatório a esse método de recuperação, mantendo a configuração de referência (110 VAC no eletrodo central), mas considerando a água em seu interior com as diferentes salinidades e saturação de água conata constante e igual a 30%. Teoricamente, o aumento da salinidade da água é positivo em termos do aumento da condutividade do meio, mas pode ser negativo, devido ao aumento que ele provoca na viscosidade da água do reservatório.

Para a produção acumulada de óleo, o aumento da salinidade da água do reservatório resultou em aumento da produção, conforme pode ser observado na Figura 17, embora as curvas das salinidades menor e intermediária tenham se sobreposto visualmente.

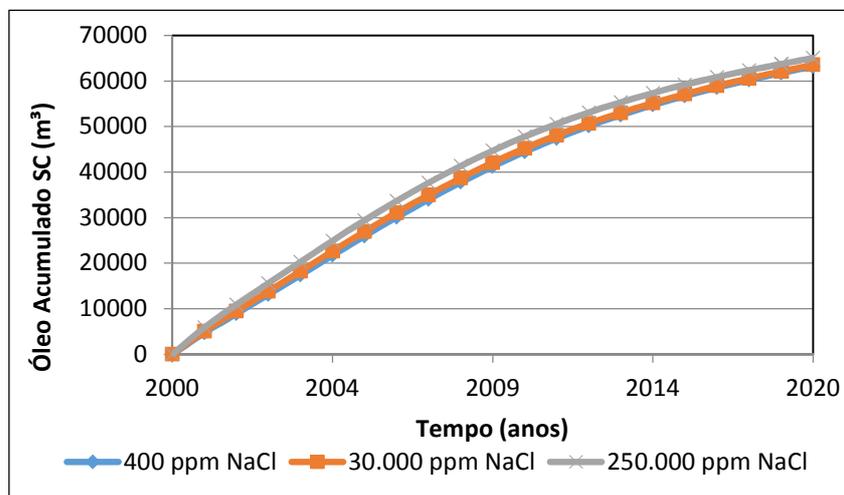


Figura 17. Produção acumulada de óleo com o sistema excitado por um eletrodo central de 110 VAC, considerando água de 400 ppm, 30.000 ppm e 250.000 ppm de concentração de NaCl no reservatório.

Numericamente, a menor salinidade da água resultou em produção de 63.183 m³ STD, a intermediária resultou em 63.564 m³ STD, e a maior em 65.073 m³ STD,

indicando que o aumento da condutividade proporcionado pelo acréscimo na salinidade se sobrepõe ao aumento da viscosidade que o mesmo efeito produz. Para a menor salinidade, a viscosidade inicial da água é de 0,68 cP; já para a salinidade intermediária, a viscosidade é de 0,71 cP; e a viscosidade inicial da água de maior salinidade é de 1,28 cP, ou seja, quase o dobro da viscosidade da água de menor salinidade.

Em relação à vazão de óleo, ocorre um pico inicial na sua produção porque após o acionamento dos eletrodos, o potencial elétrico se eleva rapidamente nas vizinhanças do poço produtor, aumentando a densidade de corrente naquela região, onde a corrente elétrica começa a fluir e influenciar na viscosidade do óleo. Esse efeito pode ser observado na Figura 18, onde foi considerada uma saturação de água conata de 30%, com teor de salinidade de 250.000 ppm, excitada por um nível de tensão de 110 VAC, na configuração monofásica.

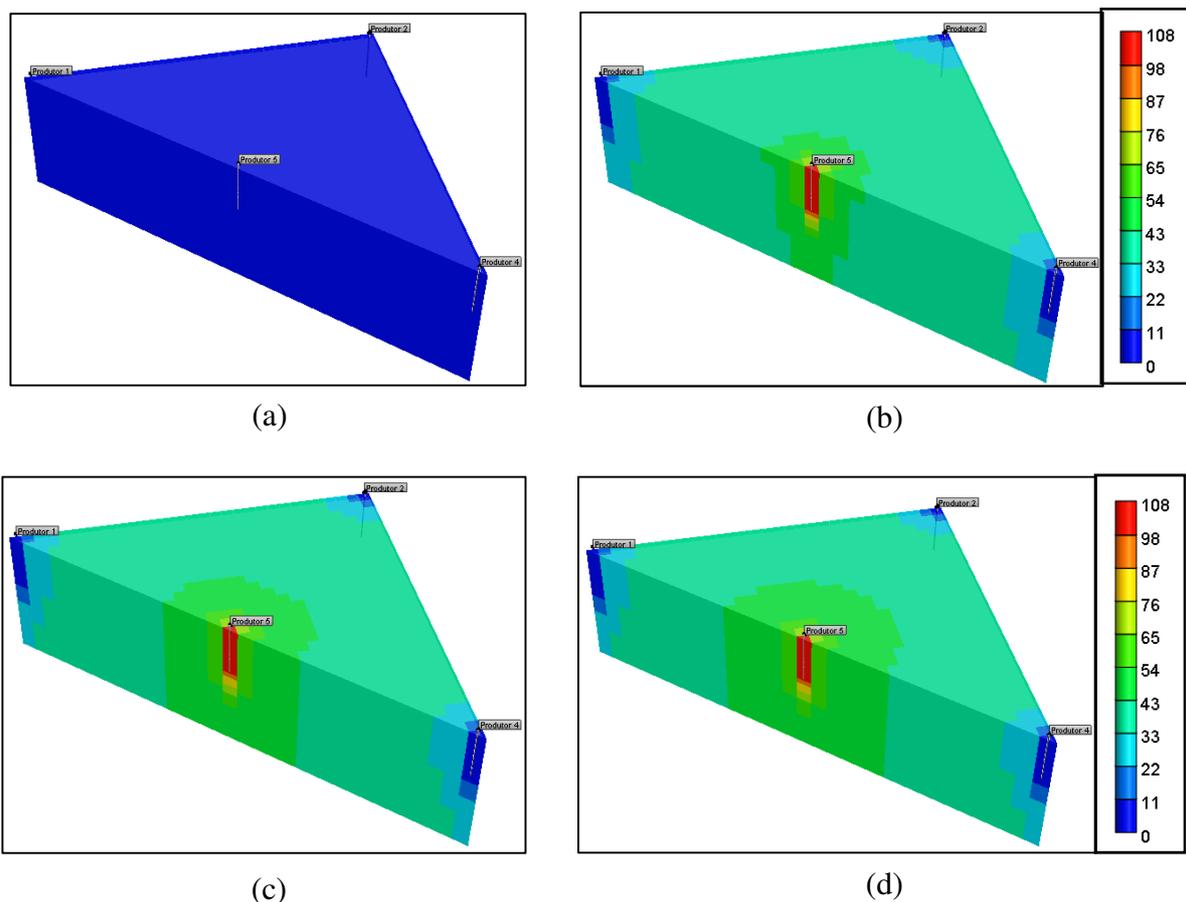


Figura 18. Evolução do potencial elétrico no reservatório, nas vizinhanças dos poços: (a) Instante inicial; (b) Em 10 dias; (c) Em 6 meses e (d) Em 1 ano.

Em relação às salinidades, elas influenciaram positivamente nos sete primeiros anos de simulação, mas depois as curvas se inverteram, conforme pode ser observado na Figura 19. Esse fato justifica a tendência inicial de divergência das curvas de produção acumulada de óleo, que voltam a convergir ao final do período de simulação, conforme observado anteriormente na Figura 17.

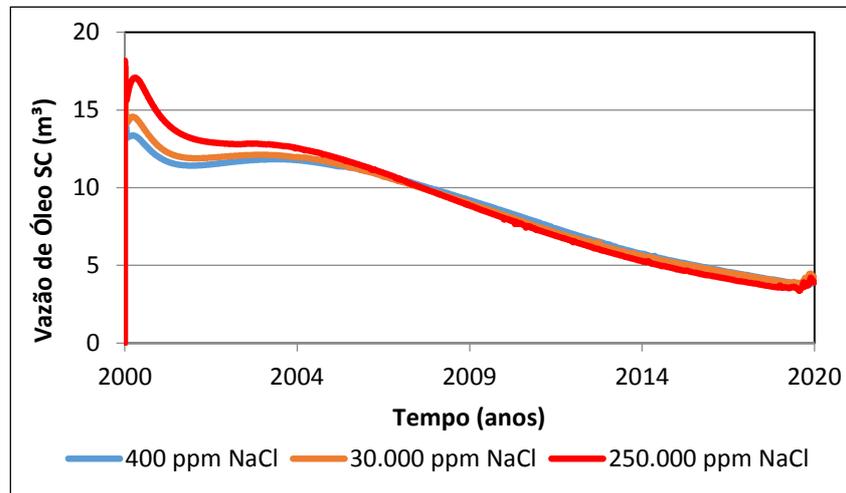


Figura 19. Vazão instantânea de óleo com o sistema excitado por um eletrodo central de 110 VAC, considerando água de 400 ppm, 30.000 ppm e 250.000 ppm de concentração de NaCl no reservatório.

A produção de água foi pouco influenciada pelo aumento das salinidades, ilustrando comportamento diverso do observado quando a comparação foi realizada apenas com a recuperação primária. Na Figura 20, as três curvas ficaram praticamente sobrepostas, uma vez que a menor salinidade resultou na produção de 127.218 m³ STD de água, a salinidade intermediária em 127.350 m³ STD de água e a maior salinidade em 125.716 m³ STD de água, menor que as demais.

A demanda por potência do sistema para cada salinidade da água é mostrada na Figura 21. Quando o reservatório possuía água com as salinidades menor e intermediária, a demanda por potência era crescente, embora as curvas indiquem uma tendência de convergência em um tempo posterior ao limite estabelecido para a simulação. Quando a água do sistema possui maior salinidade, ele é mais condutivo, mas à medida que a água vai sendo produzida, essa condutividade vai sendo reduzida, logo a corrente elétrica também se reduz, levando a uma demanda menor de potência. Como a condutividade do meio é menor para os demais casos, não ocorre esse mesmo pico de consumo.

Para o nível mais alto de salinidade, o sistema registra um pico em sua demanda, que alcança um valor próximo a 151,34 kW, mas depois essa demanda por potência começa a ser reduzida, tendendo a convergir com as demais. É provável que a produção de água promova uma redução na condutividade do meio e esse seja o fator que contribua para esse efeito, que ocorre mais intensamente quando a água tem salinidade maior.

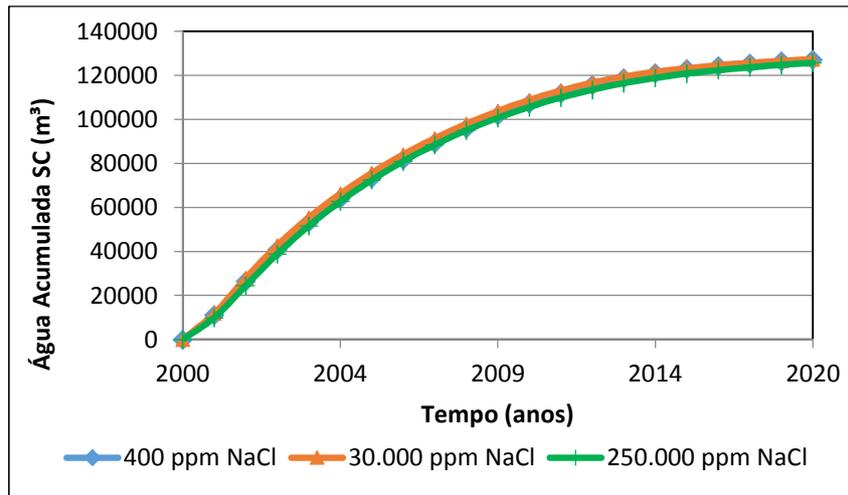


Figura 20. Produção acumulada de água com o sistema excitado por um eletrodo central de 110 VAC, considerando água de 400 ppm, 30.000 ppm e 250.000 ppm de concentração de NaCl no reservatório.

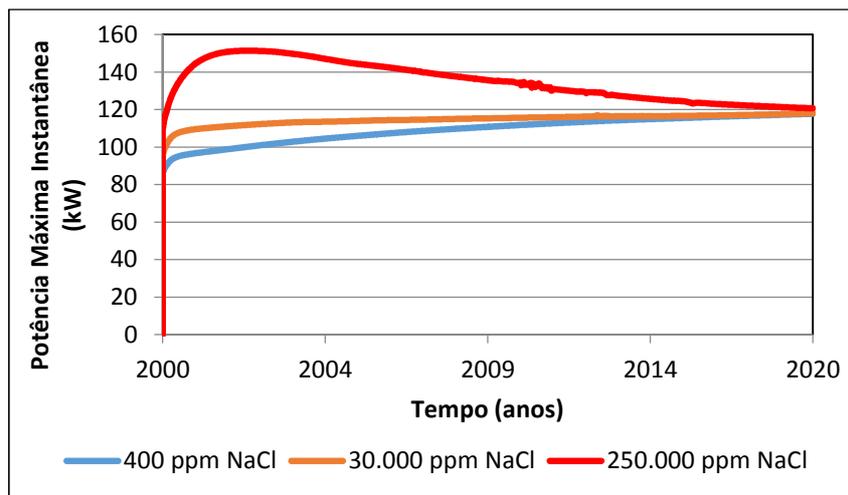


Figura 21. Demanda de potência do sistema excitado por um eletrodo central de 110 VAC, considerando água de 400 ppm, 30.000 ppm e 250.000 ppm de concentração de NaCl no reservatório.

4.3 Análise de sensibilidade de alguns parâmetros no fator de recuperação, em diferentes tempos de projeto

O planejamento aplicado foi do tipo fatorial completo, do tipo 3^4 , que resultou na avaliação de 81 casos, para os fatores e níveis mostrados na Tabela 7, considerando intervalos de 5 anos, em um horizonte de 20 anos de simulação. O objetivo desse estudo era verificar as combinações que resultavam em maximização do fator de recuperação.

Após a realização das simulações, foi preenchida a Tabela 8, listando os fatores de recuperação computados para todos os casos de estudo definidos, nos instantes de tempo desejados. Esses dados foram processados em um *software* de análise estatística, que gerou diagramas de Pareto e as superfícies de resposta, sendo essas últimas geradas preferencialmente para os casos considerados estatisticamente significativos, embora também tenham sido geradas algumas superfícies para outros casos considerados também relevantes.

A análise desses dados foi dividida em quatro subtópicos, de acordo com os referidos intervalos de tempo definidos, que serão mostrados a seguir.

Tabela 8. Casos avaliados e fatores de recuperação obtidos para cada simulação.

	Água Conata	Salinidade	Conf Elet	Nív Tensão	F.R.			
					05 anos	10 anos	15 anos	20 anos
Caso 78	1	1	0	1	39.18	57.33	62.79	65.17
Caso 51	0	1	0	1	37.28	55.72	61.93	64.73
Caso 77	1	1	0	0	32.32	51.67	60.59	64.57
Caso 24	-1	1	0	1	35.54	54.35	61.34	64.49
Caso 69	1	0	0	1	37.65	56.01	61.46	63.77
Caso 50	0	1	0	0	30.51	49.59	59.09	63.72
Caso 60	1	-1	0	1	37.02	55.96	61.34	63.63
Caso 42	0	0	0	1	36.02	54.73	60.89	63.51
Caso 33	0	-1	0	1	35.58	54.73	60.83	63.48
Caso 15	-1	0	0	1	34.51	53.65	60.56	63.44
Caso 6	-1	-1	0	1	34.18	53.67	60.46	63.36
Caso 68	1	0	0	0	29.19	49.68	59.10	63.29
Caso 23	-1	1	0	0	28.95	47.74	57.85	63.15
Caso 81	1	1	1	1	32.78	51.71	60.15	63.12
Caso 59	1	-1	0	0	27.97	49.26	58.81	63.06
Caso 41	0	0	0	0	27.76	47.94	57.93	62.78
Caso 32	0	-1	0	0	26.68	47.64	57.69	62.58
Caso 14	-1	0	0	0	26.49	46.36	57.02	62.52
Caso 5	-1	-1	0	0	25.45	46.12	56.76	62.31
Caso 54	0	1	1	1	31.07	49.81	59.00	62.23

	Água Conata	Salinidade	Conf Elet	Nív Tensão	F.R.			
					05 anos	10 anos	15 anos	20 anos
Caso 72	1	0	1	1	29.61	49.24	58.58	61.85
Caso 63	1	-1	1	1	28.28	48.62	58.23	61.66
Caso 27	-1	1	1	1	29.54	48.16	57.88	61.34
Caso 45	0	0	1	1	28.21	47.62	57.60	61.11
Caso 36	0	-1	1	1	27.00	47.09	57.25	60.92
Caso 80	1	1	1	0	26.03	44.40	55.00	60.80
Caso 18	-1	0	1	1	26.94	46.21	56.76	60.53
Caso 9	-1	-1	1	1	25.80	45.69	56.41	60.34
Caso 53	0	1	1	0	24.49	42.38	53.12	59.46
Caso 71	1	0	1	0	22.75	41.09	52.42	59.02
Caso 76	1	1	0	-1	22.75	40.30	51.67	58.78
Caso 62	1	-1	1	0	21.47	40.01	51.68	58.51
Caso 26	-1	1	1	0	23.13	40.59	51.46	58.33
Caso 44	0	0	1	0	21.48	39.32	50.78	57.91
Caso 35	0	-1	1	0	20.28	38.36	50.09	57.44
Caso 75	1	1	-1	1	22.78	40.35	51.16	57.35
Caso 67	1	0	0	-1	20.42	37.47	49.11	57.22
Caso 49	0	1	0	-1	21.37	38.32	49.62	57.08
Caso 17	-1	0	1	0	20.34	37.75	49.35	57.01
Caso 58	1	-1	0	-1	19.31	36.40	48.40	56.68
Caso 8	-1	-1	1	0	19.19	36.84	48.67	56.52
Caso 66	1	0	-1	1	20.61	37.79	49.03	55.77
Caso 40	0	0	0	-1	19.19	35.70	47.37	55.76
Caso 48	0	1	-1	1	21.29	38.19	49.00	55.57
Caso 22	-1	1	0	-1	20.17	36.60	47.86	55.52
Caso 57	1	-1	-1	1	19.75	36.97	48.59	55.45
Caso 31	0	-1	0	-1	18.14	34.69	46.64	55.26
Caso 13	-1	0	0	-1	18.09	34.15	45.80	54.33
Caso 39	0	0	-1	1	19.34	35.94	47.12	54.28
Caso 21	-1	1	-1	1	20.00	36.26	47.07	54.00
Caso 30	0	-1	-1	1	18.56	35.22	46.75	53.96
Caso 4	-1	-1	0	-1	17.06	33.14	45.04	53.84
Caso 12	-1	0	-1	1	18.22	34.30	45.42	52.97
Caso 3	-1	-1	-1	1	17.47	33.63	45.09	52.68
Caso 79	1	1	1	-1	18.52	33.53	44.47	52.00
Caso 74	1	1	-1	0	18.16	33.04	44.19	51.76
Caso 52	0	1	1	-1	17.31	31.65	42.32	49.88
Caso 47	0	1	-1	0	16.91	31.08	41.97	49.55
Caso 65	1	0	-1	0	16.66	30.97	41.76	49.54
Caso 70	1	0	1	-1	16.47	30.60	41.23	49.32
Caso 56	1	-1	-1	0	15.95	30.13	41.04	49.02
Caso 61	1	-1	1	-1	15.57	29.47	40.22	48.49
Caso 25	-1	1	1	-1	16.23	29.94	40.41	47.96
Caso 20	-1	1	-1	0	15.82	29.33	40.00	47.57
Caso 38	0	0	-1	0	15.52	29.17	39.75	47.54
Caso 43	0	0	1	-1	15.36	28.86	39.27	47.37

	Água Conata	Salinidade	Conf Elet	Nív Tensão	F.R.			
					05 anos	10 anos	15 anos	20 anos
Caso 29	0	-1	-1	0	14.87	28.39	39.07	47.07
Caso 34	0	-1	1	-1	14.51	27.78	38.30	46.59
Caso 11	-1	0	-1	0	14.50	27.59	37.98	45.75
Caso 16	-1	0	1	-1	14.36	27.32	37.54	45.60
Caso 2	-1	-1	-1	0	13.88	26.83	37.32	45.28
Caso 7	-1	-1	1	-1	13.54	26.26	36.59	44.83
Caso 73	1	1	-1	-1	13.99	25.64	35.20	42.63
Caso 64	1	0	-1	-1	13.08	24.38	33.54	40.69
Caso 46	0	1	-1	-1	12.96	23.93	33.10	40.34
Caso 55	1	-1	-1	-1	12.65	23.72	32.86	40.07
Caso 37	0	0	-1	-1	12.07	22.67	31.47	38.44
Caso 19	-1	1	-1	-1	12.04	22.38	31.20	38.28
Caso 28	0	-1	-1	-1	11.66	22.05	30.81	37.85
Caso 10	-1	0	-1	-1	11.18	21.18	29.66	36.47
Caso 1	-1	-1	-1	-1	10.78	20.57	29.00	35.88

4.3.1 Tempo de projeto: 5 anos

A Figura 22 mostra o diagrama de Pareto obtido a partir dos fatores de recuperação simulados para 5 anos de projeto. Através do referido diagrama é possível observar que o nível de tensão é a variável de maior influência para maximização do fator de recuperação nesse intervalo de tempo, influenciando positivamente esse fator, à medida que tem seu nível elevado.

O diagrama de Pareto também possibilitou verificar as interações estatisticamente significativas entre os parâmetros avaliados, de onde se constatou a significância das seguintes interações: nível de tensão e configuração elétrica; configuração elétrica e teor de salinidade da água; nível de tensão e teor de salinidade da água; nível de tensão e saturação de água conata; configuração elétrica e saturação de água conata; e a interação entre saturação de água conata e teor de salinidade da água.

Todas as superfícies de resposta construídas para 5 anos de projeto são mostradas na Figura 23. Para todas as superfícies construídas, os parâmetros que não estavam sendo avaliados foram mantidos em seus níveis intermediários.

Avaliando a superfície de resposta de interação entre o nível de tensão e a configuração elétrica adotada (Figura 23a), observa-se que o maior fator de recuperação (35,3%) foi obtido quando se optou pela configuração elétrica intermediária (trifásica, com uma tensão de defasagem nula e dois pares de tensões com 120° e 240°), excitada

pelo maior nível de tensão (110 volts). Na figura, observa-se que o ponto de máximo do gráfico ocorre de fato entre os pontos de configuração elétrica de nível intermediário e máximo, mas como se trata de uma variável discreta, não seria possível inferir um fator de recuperação para o referido ponto, razão pela qual foi mencionado o ponto da configuração adotada como intermediária.

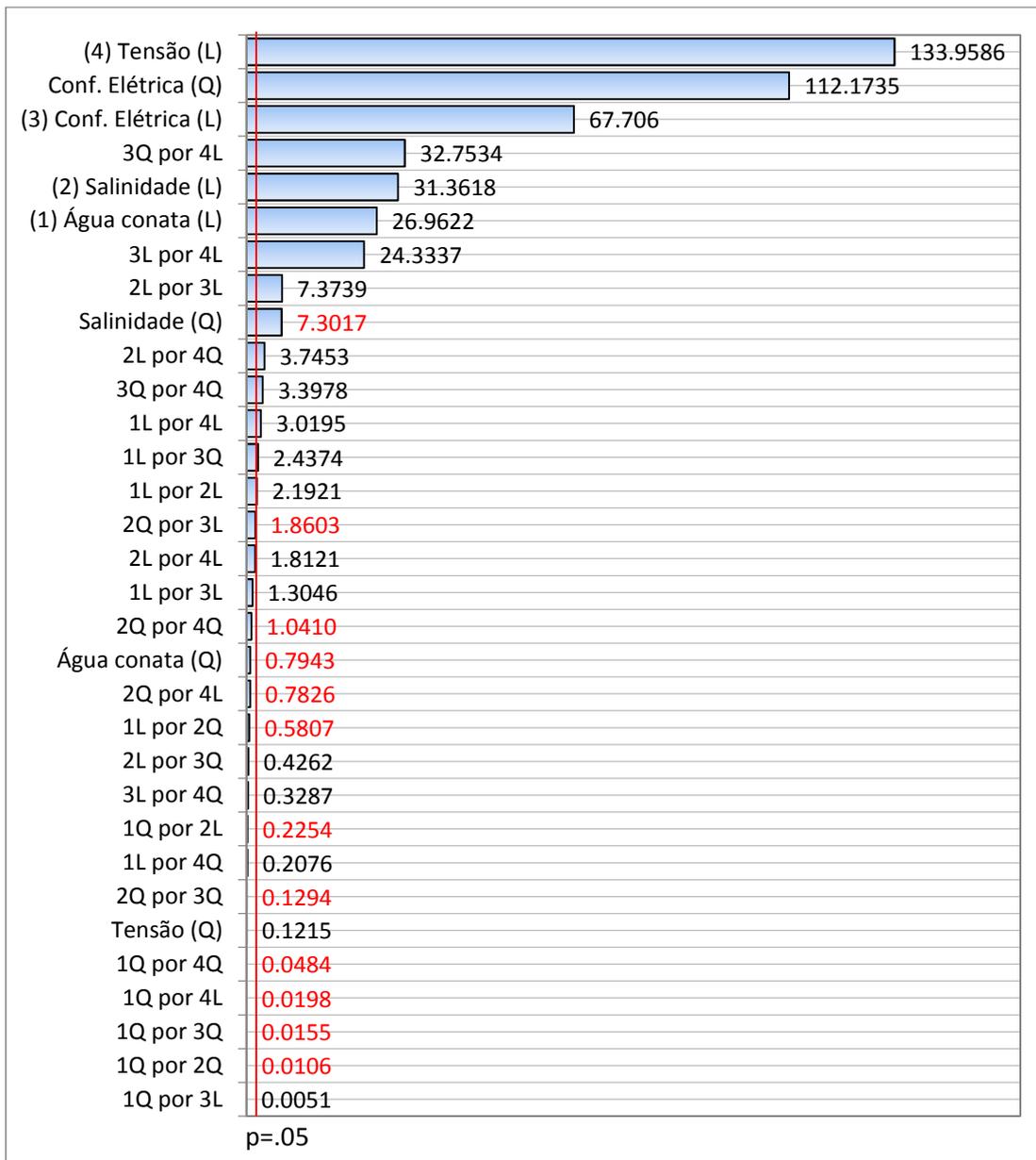


Figura 22. Diagrama de Pareto gerado para a análise do fator de recuperação considerando 5 anos de projeto.

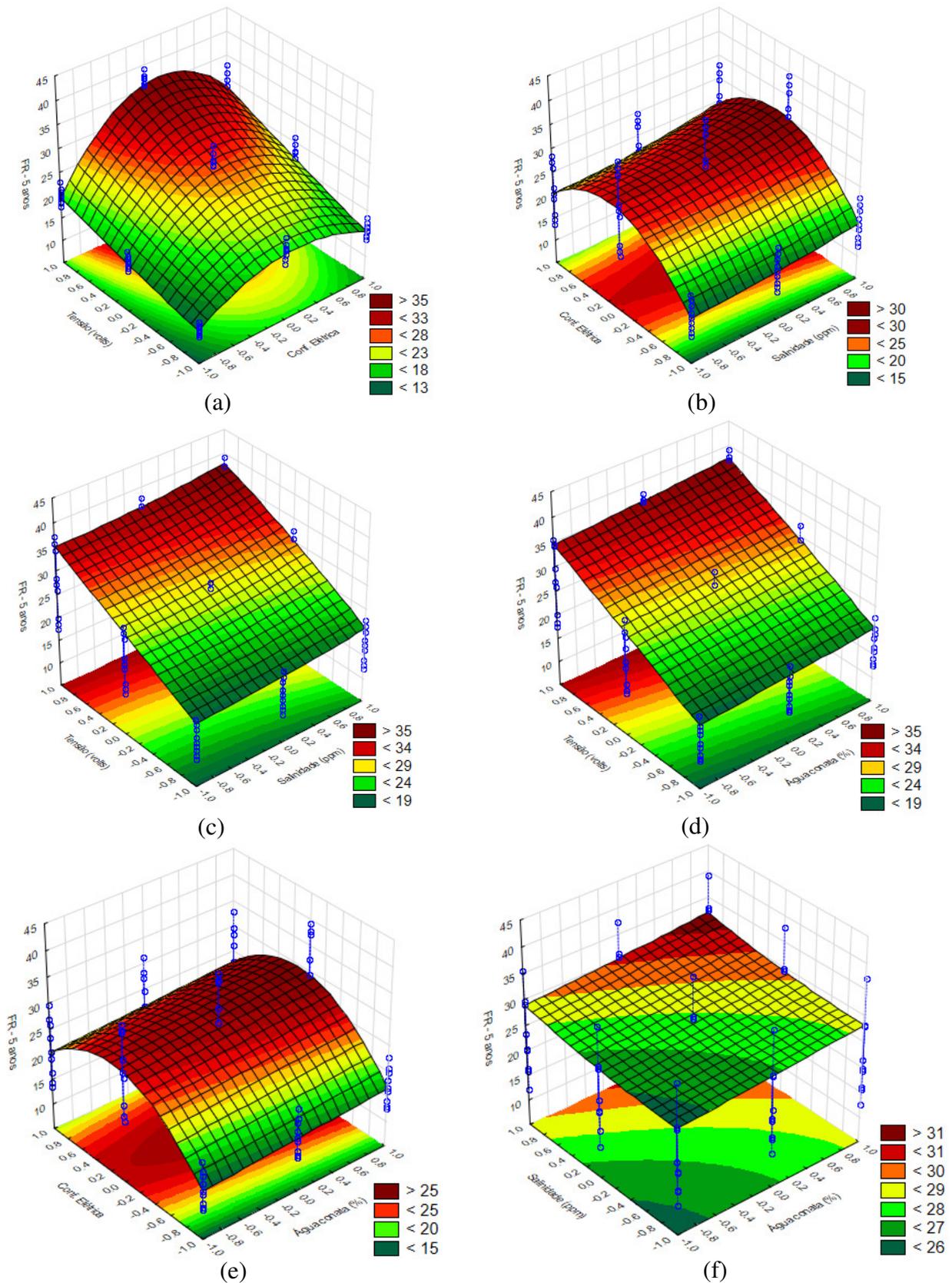


Figura 23. Superfícies de resposta para 5 anos de projeto, com as seguintes interações: (a) nível de tensão e configuração elétrica; (b) configuração elétrica e salinidade da água; (c) nível de tensão e salinidade da água; (d) nível de tensão e saturação de água conata; (e) configuração elétrica e saturação de água conata; e (f) saturação de água conata e salinidade da água.

Analisando a superfície de resposta de interação entre a configuração elétrica e a salinidade da água do reservatório (Figura 23b), verifica-se que o maior fator de recuperação (30,5%) foi obtido utilizando a configuração elétrica intermediária (trifásica) e com a água do reservatório em seu maior teor de salinidade (250.000 ppm).

Para a superfície de resposta da interação entre nível de tensão e salinidade da água do reservatório (Figura 23c), o maior fator de recuperação (37,4%) foi obtido excitando os eletrodos com o maior nível de tensão e mantendo a água do reservatório com maior teor de salinidade.

Avaliando a superfície de resposta de interação entre o nível de tensão e a saturação de água conata (Figura 23d), o maior fator de recuperação (37%) foi obtido como resultado da excitação dos eletrodos com o maior nível de tensão, em um ambiente com a maior saturação de água conata (40%). Embora o fator de recuperação nem sempre reflita o maior volume de óleo produzido no cenário estudado.

Para o caso da superfície de resposta de interação entre a configuração elétrica e a saturação de água conata (Figura 23e), o maior fator de recuperação (29,2%) foi obtido devido à adoção da configuração elétrica trifásica (nível intermediário do parâmetro) no reservatório com maior saturação de água conata.

Para a interação entre a saturação de água conata do reservatório e o teor de salinidade da água (Figura 23f), verificou-se que o maior fator de recuperação obtido (32,3%) foi resultado da maior saturação de água conata no reservatório, com essa água tendo o maior teor de salinidade.

Em síntese, as condições para maximização do fator de recuperação, nesse tempo de projeto, são convergentes: maior saturação de água conata no reservatório (40%), com maior teor de sal (250.000 ppm), sendo o reservatório aquecido pelos eletrodos na configuração trifásica, excitados com maior nível de tensão (110 volts).

4.3.2 Tempo de projeto: 10 anos

A Figura 24 apresenta o diagrama de Pareto obtido a partir dos fatores de recuperação, simulados para 10 anos de projeto. Através desse diagrama é possível observar que o nível de tensão é novamente a variável de maior influência para maximização do fator de recuperação nesse intervalo de tempo, influenciando positivamente o fator de recuperação, à medida que seu nível é elevado.

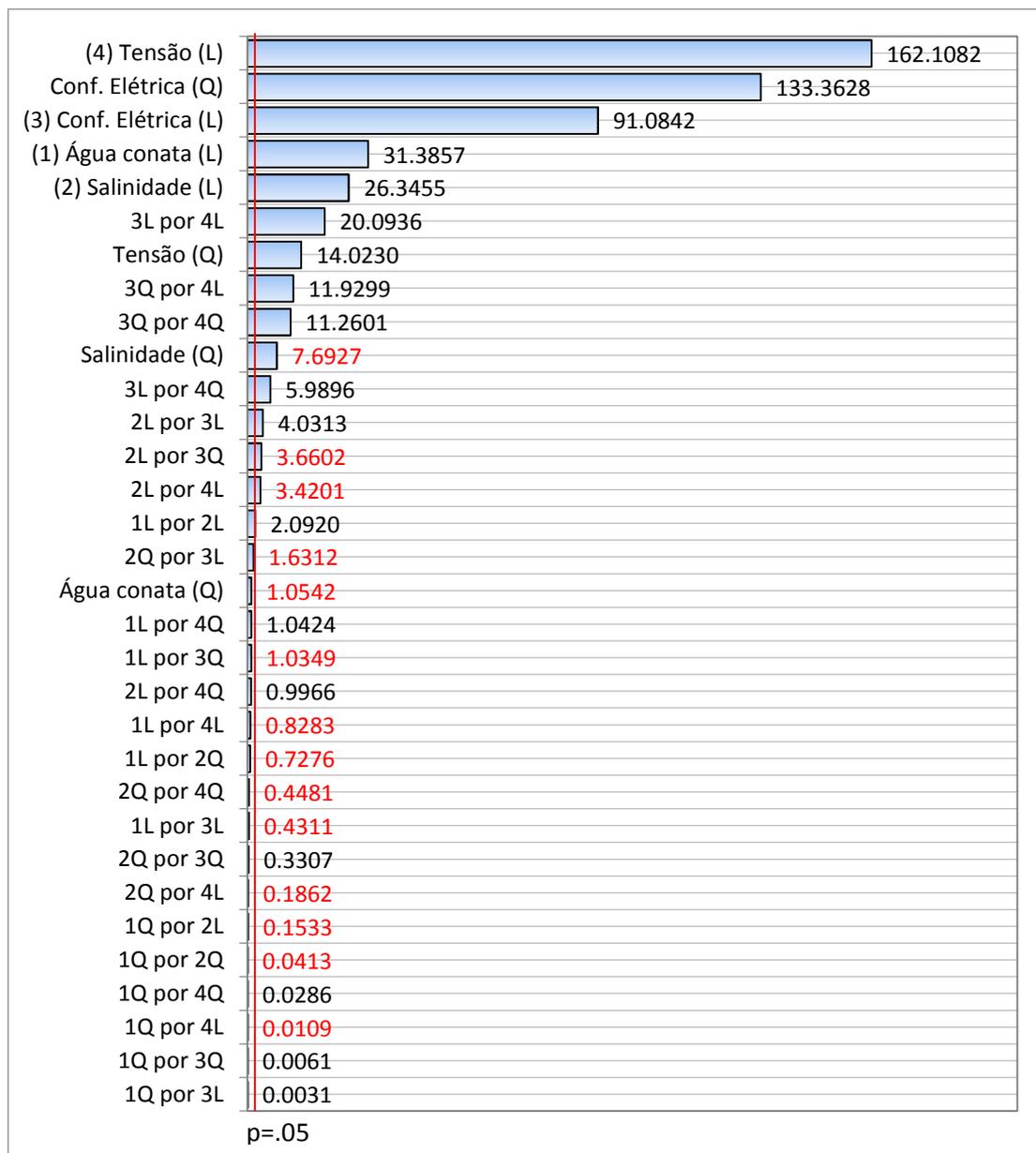


Figura 24. Diagrama de Pareto gerado para a análise do fator de recuperação considerando 10 anos de projeto.

Nos 10 anos de projeto, foi possível verificar no diagrama de Pareto quais as interações estatisticamente significativas entre os parâmetros avaliados, de onde se constatou a significância das seguintes interações: nível de tensão e configuração elétrica; configuração elétrica e teor de salinidade da água; entre o nível de tensão e o teor de salinidade da água; e a interação entre o teor de salinidade da água e saturação de água conata do reservatório. Para os casos citados foram construídas as superfícies de

resposta mostradas na Figura 25, considerando apenas os casos estatisticamente significativos.

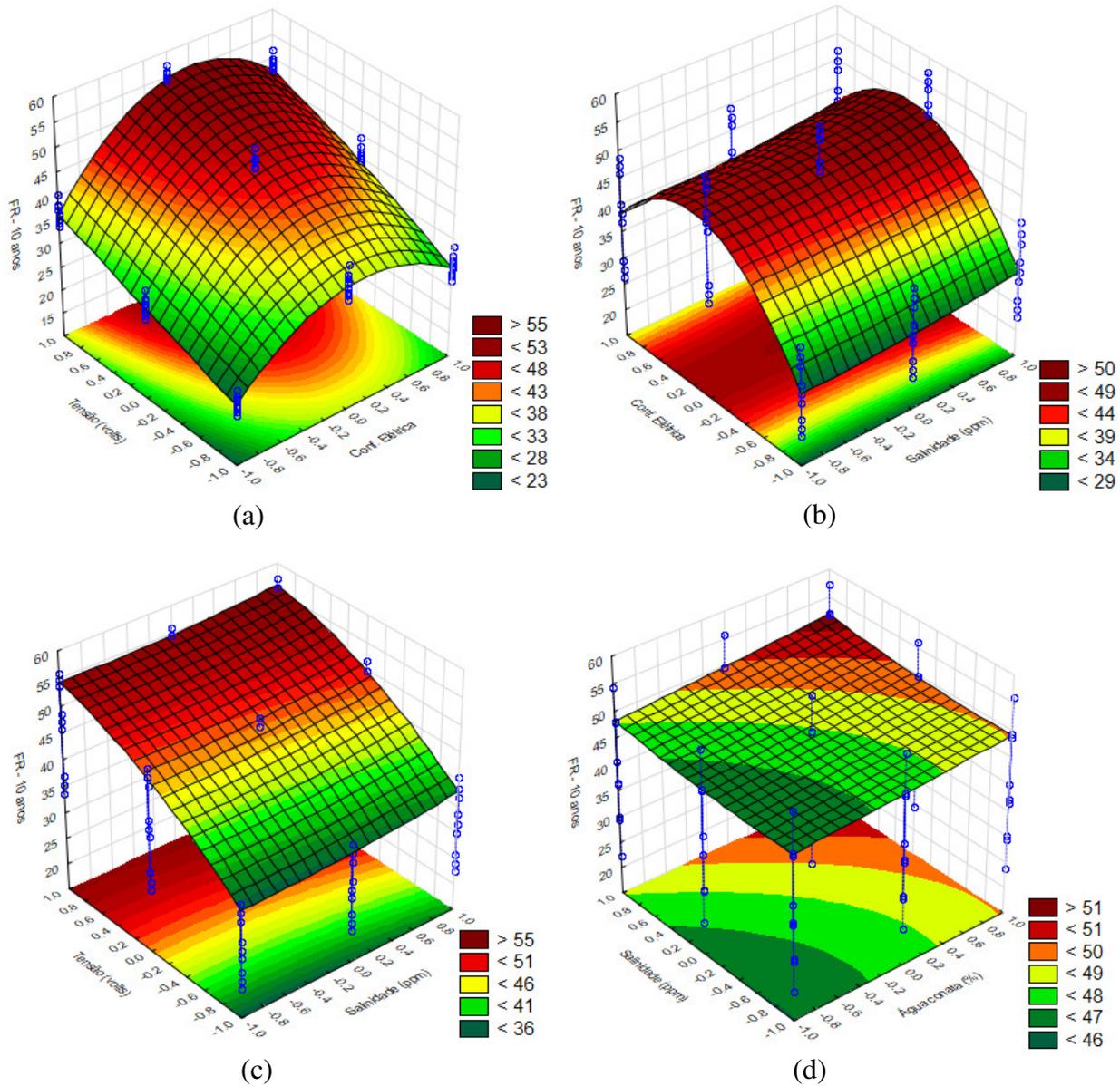


Figura 25. Superfícies de resposta para 10 anos de projeto, com as seguintes interações: (a) nível de tensão e configuração elétrica; (b) configuração elétrica e teor de salinidade da água do reservatório; (c) nível de tensão e salinidade da água do reservatório; e (d) teor de salinidade da água do reservatório e saturação de água conata.

Avaliando a superfície de resposta de interação entre o nível de tensão e a configuração elétrica adotada (Figura 25a), foi verificado que o maior fator de recuperação (54,3%) foi obtido quando novamente se optou pela configuração elétrica do nível intermediário (trifásica), excitada pelo maior nível de tensão (110 volts).

Da mesma forma que para 5 anos de tempo de projeto, analisando a superfície de resposta de interação entre a configuração elétrica e a salinidade da água do reservatório (Figura 25b), verifica-se que o maior fator de recuperação (49,6%) também foi obtido utilizando a configuração elétrica intermediária (trifásica) e com a água do reservatório em seu maior teor de salinidade (250.000 ppm).

Para a superfície de resposta da interação entre nível de tensão e salinidade da água do reservatório (Figura 25c), o maior fator de recuperação (56%) foi obtido excitando os eletrodos com o maior nível de tensão e mantendo a água do reservatório com maior teor de salinidade.

Para a interação entre a saturação de água conata do reservatório e o teor de salinidade da água (Figura 25d), verificou-se que o maior fator de recuperação obtido (51,6%) foi resultado da maior saturação de água conata no reservatório, com essa água tendo o maior teor de salinidade.

Embora tenha sido analisado um menor número de superfícies de resposta para 10 anos de projeto, as condições para maximização do fator de recuperação foram semelhantes ao caso anterior: maior saturação de água conata no reservatório (40%), com maior teor de sal (250.000 ppm), sendo o reservatório aquecido pelos eletrodos na configuração trifásica, excitados com maior nível de tensão (110 volts).

4.3.3 Tempo de projeto: 15 anos

A Figura 26 apresenta o diagrama de Pareto obtido a partir dos fatores de recuperação simulados para 15 anos de projeto. Avaliando o referido diagrama é possível concluir que o nível de tensão é novamente a variável de maior influência para maximização do fator de recuperação nesse intervalo de tempo, influenciando positivamente esse fator, à medida que tem seu nível elevado.

A partir do Pareto foram verificadas as interações estatisticamente significativas entre os parâmetros avaliados, de onde se constatou a significância das seguintes interações: nível de tensão e configuração elétrica; nível de tensão e saturação de água conata no reservatório; nível de tensão e teor de salinidade da água; configuração elétrica e teor de salinidade da água; configuração elétrica e saturação de água conata; e a interação entre saturação de água conata e teor de salinidade da água.

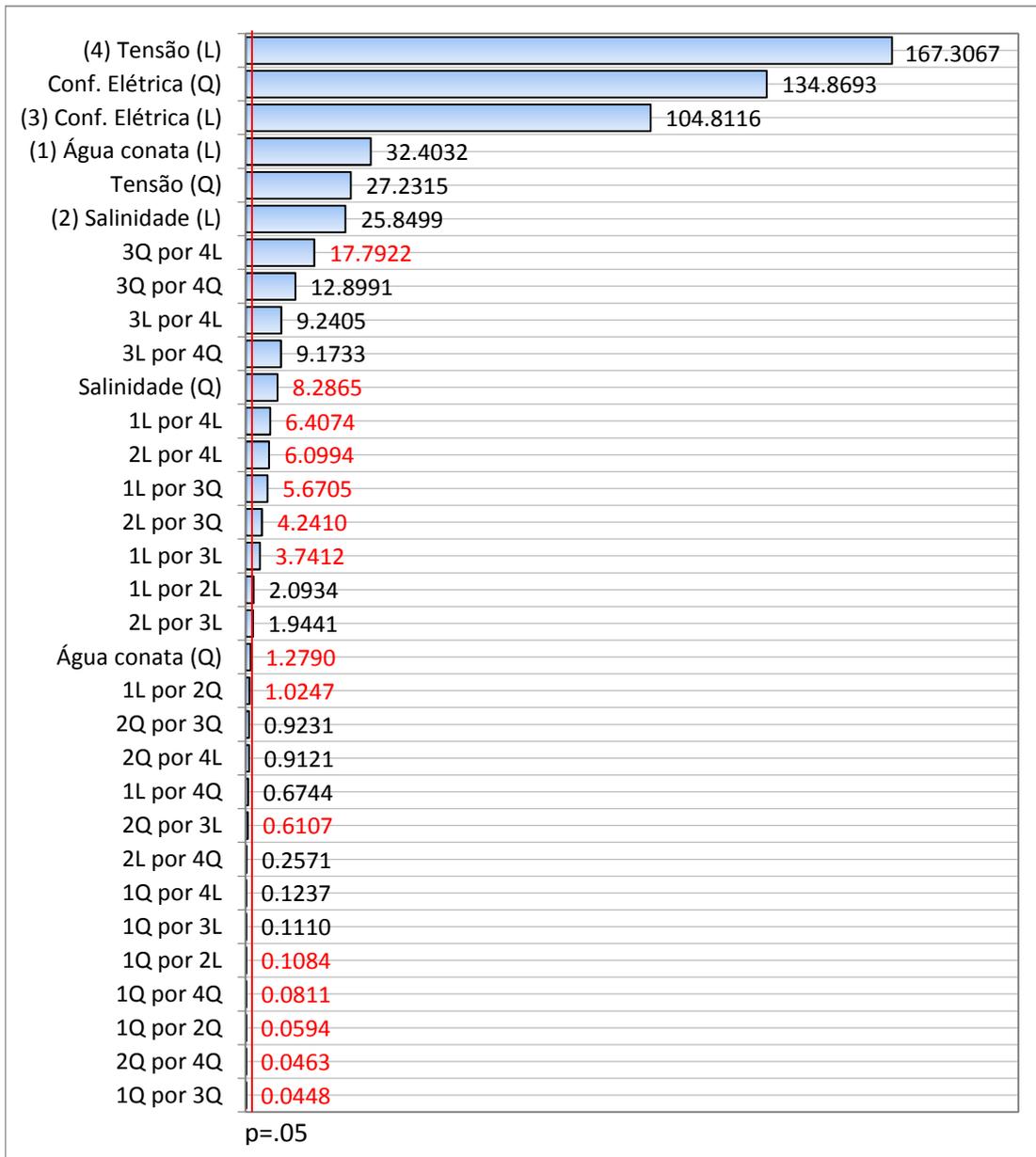


Figura 26. Diagrama de Pareto gerado para a análise do fator de recuperação considerando 15 anos de projeto.

Avaliando a superfície de resposta de interação entre o nível de tensão e a configuração elétrica adotada (Figura 27a), foi verificado que o maior fator de recuperação (62,4%) foi obtido quando se optou mais uma vez pela configuração elétrica do nível intermediário (trifásica), excitada pelo maior nível de tensão (110 volts).

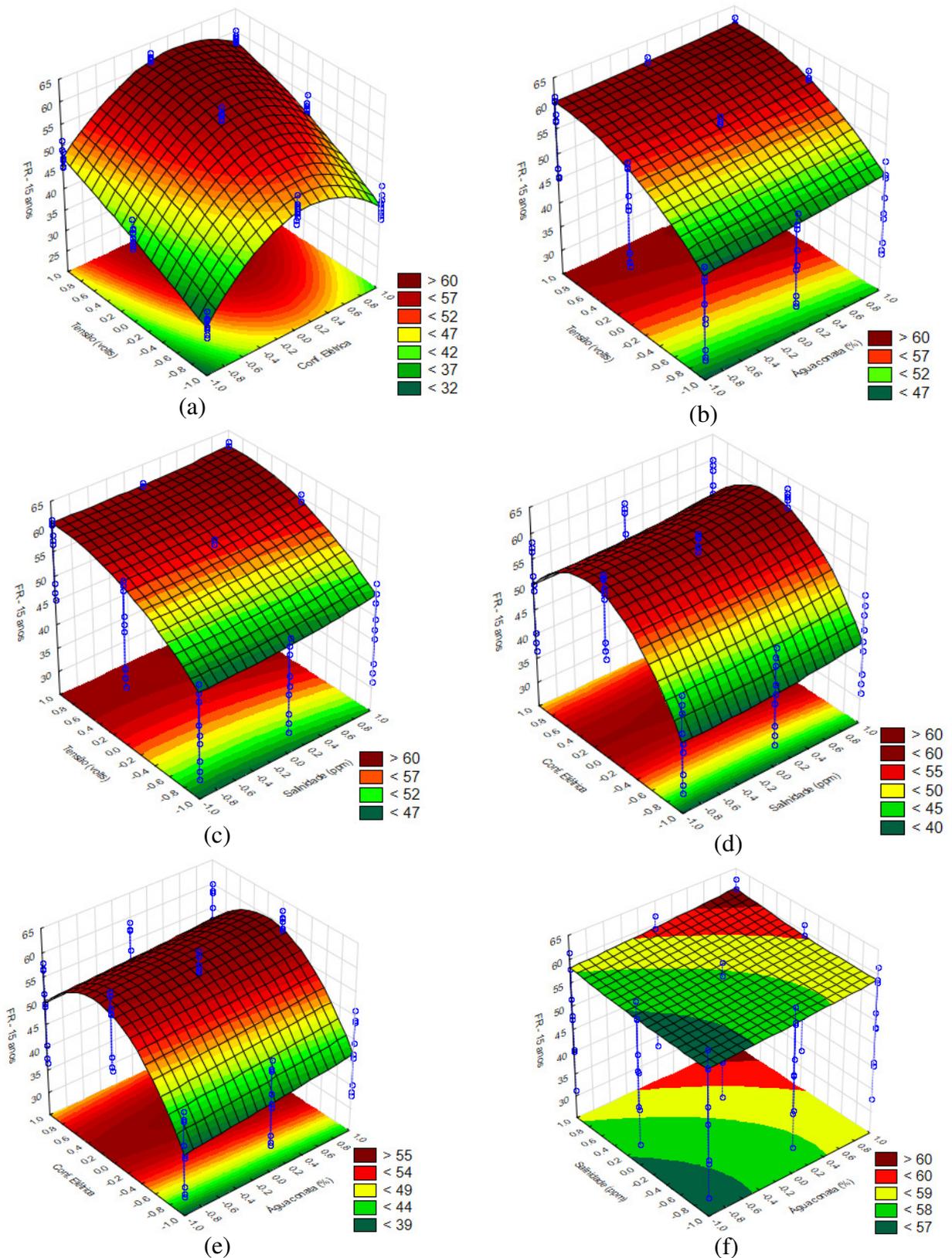


Figura 27. Superfícies de resposta para 15 anos de projeto, com as seguintes interações: (a) nível de tensão e configuração elétrica; (b) nível de tensão e saturação de água conata; (c) nível de tensão e teor de salinidade da água; (d) configuração elétrica e teor de salinidade da água; (e) configuração elétrica e saturação de água conata; e (f) teor de salinidade da água e saturação de água conata.

Para a superfície de resposta da interação entre nível de tensão e saturação de água conata do reservatório (Figura 27b), o maior fator de recuperação (61,3%) foi obtido excitando os eletrodos com o maior nível de tensão e com o reservatório contendo maior saturação de água conata (40%).

Avaliando a superfície de resposta de interação entre o nível de tensão e o teor de salinidade da água (Figura 27c), o maior fator de recuperação (61,3%) foi obtido como resultado da excitação dos eletrodos com o maior nível de tensão, em um ambiente com maior teor de salinidade (250.000 ppm).

Para o caso da superfície de resposta de interação entre a configuração elétrica e o teor de salinidade da água (Figura 27d), o maior fator de recuperação (59,1%) foi obtido devido à adoção da configuração elétrica trifásica (nível intermediário do parâmetro) no reservatório com água de maior teor de salinidade.

Para a superfície de resposta da interação entre configuração elétrica e saturação de água conata do reservatório (Figura 27e), o maior fator de recuperação (58,8%) foi obtido adotando-se a configuração elétrica de nível intermediário (trifásica), com o reservatório e mantendo a maior saturação de água conata.

Para a superfície de resposta da interação entre o teor de salinidade da água e a saturação de água conata do reservatório (Figura 27f), o maior fator de recuperação (60,6%) foi obtido no reservatório com maior saturação de água conata e maior teor de salinidade da água.

Para 15 anos de projeto, com base na análise das superfícies de resposta, conclui-se que o fator de recuperação é maximizado pelas mesmas condições verificadas nos casos anteriores: maior saturação de água conata no reservatório (40%), com maior teor de sal (250.000 ppm), sendo o reservatório aquecido pelos eletrodos na configuração trifásica, excitados com maior nível de tensão (110 volts).

4.3.4 Tempo de projeto: 20 anos

A Figura 28 apresenta o diagrama de Pareto obtido a partir dos fatores de recuperação simulados para 20 anos de projeto. Avaliando o referido Pareto é possível concluir que o nível de tensão permanece sendo a variável de maior influência para maximização do fator de recuperação nesse intervalo de tempo, influenciando positivamente esse fator, à medida que tem seu nível elevado. Em todos os períodos de tempo avaliados, individualmente, essa variável foi a mais influente para o FR.

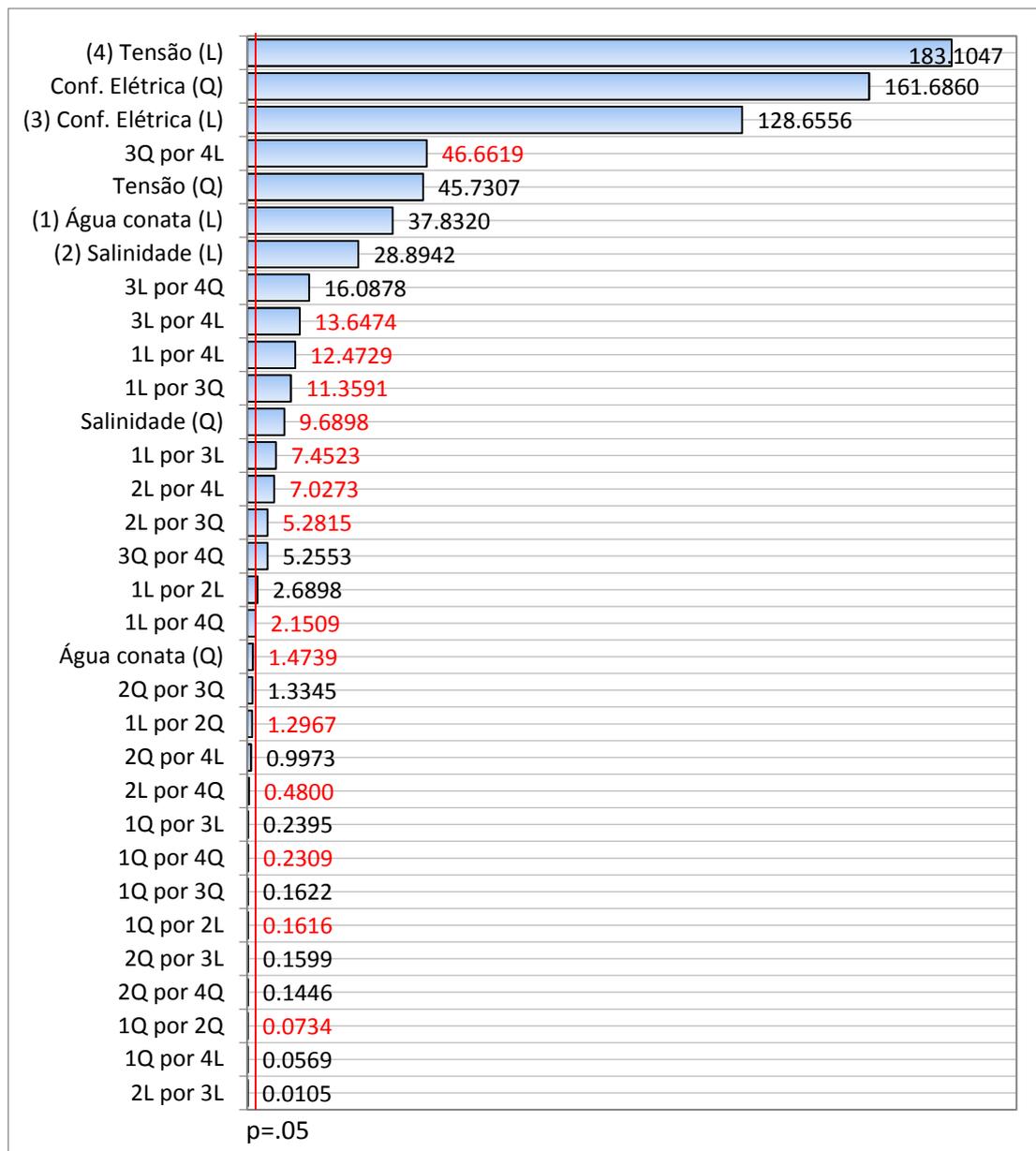


Figura 28. Diagrama de Pareto gerado para a análise do fator de recuperação considerando 20 anos de projeto.

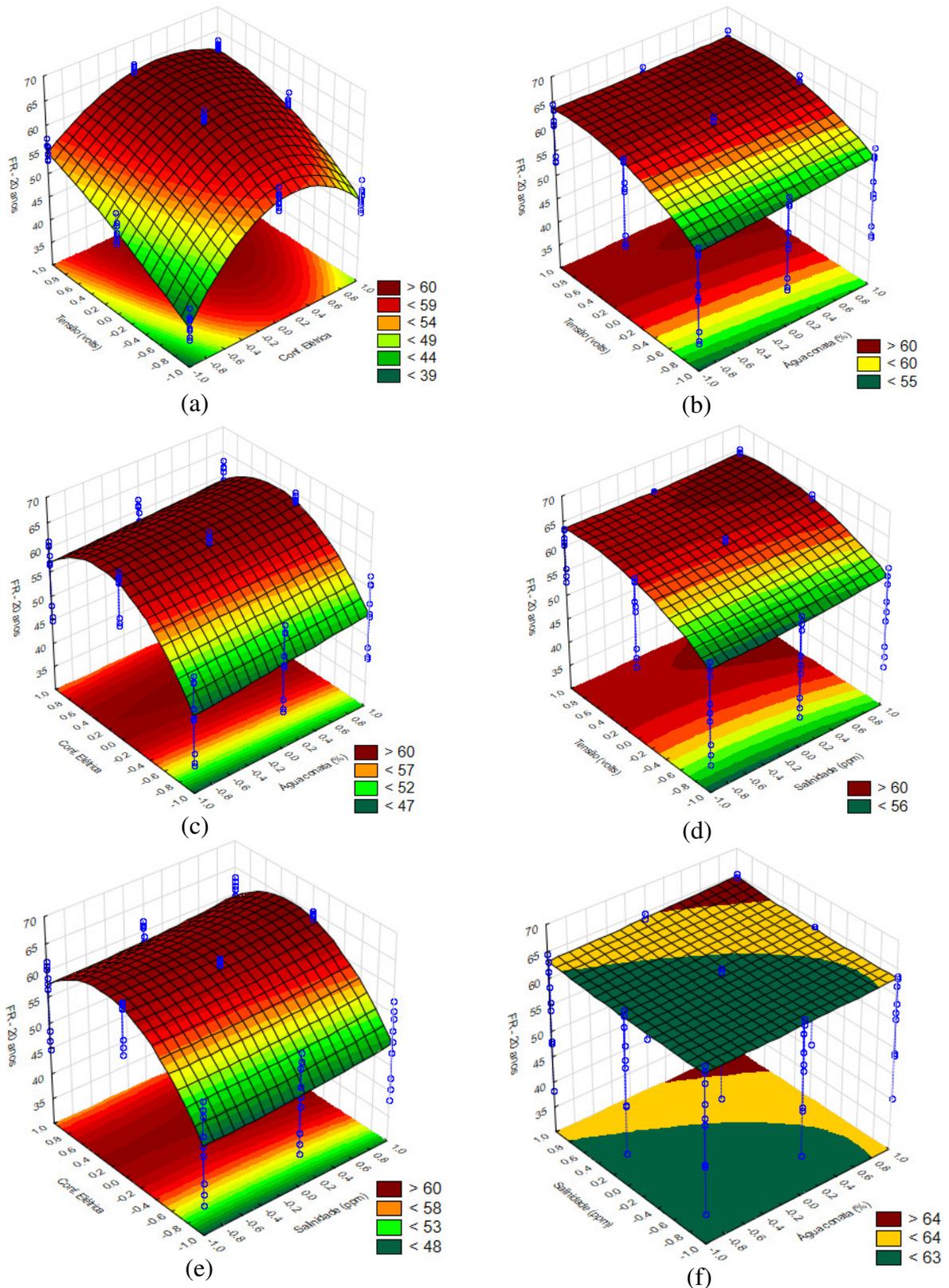


Figura 29. Superfícies de resposta para 15 anos de projeto, com as seguintes interações: (a) nível de tensão e configuração elétrica; (b) nível de tensão e saturação de água conata; (c) configuração elétrica e saturação de água conata; (d) nível de tensão e salinidade da água; (e) configuração elétrica e salinidade da água; e (f) salinidade da água do reservatório e saturação de água conata.

A partir do Pareto foram verificadas as interações estatisticamente significativas entre os parâmetros avaliados, de onde se constatou a significância das seguintes interações: nível de tensão e configuração elétrica; nível de tensão e teor de salinidade da água; nível de tensão e teor de salinidade da água do reservatório; nível de tensão e saturação de água conata; e a interação entre configuração elétrica e saturação de água conata.

Avaliando a superfície de resposta de interação entre o nível de tensão e a configuração elétrica adotada (Figura 29a), foi verificado que o maior fator de recuperação (63,3%) foi obtido quando se optou outra vez pela configuração elétrica do nível intermediário (trifásica), excitada pelo maior nível de tensão (110 volts).

Avaliando a superfície de resposta de interação entre o nível de tensão e a saturação de água conata (Figura 29b), o maior fator de recuperação (63,6%) foi obtido como resultado da excitação dos eletrodos com o maior nível de tensão, em um ambiente com a maior saturação de água conata (40%).

Para o caso da superfície de resposta de interação entre a configuração elétrica e a saturação de água conata (Figura 29c), o maior fator de recuperação (63%) foi obtido devido à adoção da configuração elétrica trifásica (nível intermediário do parâmetro) no reservatório com maior saturação de água conata.

Para a superfície de resposta da interação entre nível de tensão e salinidade da água do reservatório (Figura 29d), o maior fator de recuperação (64,5%) foi obtido excitando os eletrodos com o maior nível de tensão e mantendo a água do reservatório com maior teor de salinidade (250.000 ppm).

Analisando a superfície de resposta de interação entre a configuração elétrica e a salinidade da água do reservatório (Figura 29e), verifica-se que o maior fator de recuperação (64,5%) foi obtido utilizando a configuração elétrica intermediária (trifásica) e com a água do reservatório em seu maior teor de salinidade (250.000 ppm).

Por fim, a superfície de resposta de interação entre a saturação de água conata do reservatório e o teor de salinidade da água (Figura 29f) mostrou que o maior fator de recuperação obtido (65%) foi obtido como resultado da maior saturação de água conata no reservatório, com essa água tendo o maior teor de salinidade.

Para 20 anos de projeto, com base nessas observações, conclui-se que o fator de recuperação permanece maximizado pelas mesmas condições verificadas nos casos anteriores: maior saturação de água conata no reservatório (40%), com maior teor de sal

(250.000 ppm), sendo o reservatório aquecido pelos eletrodos na configuração trifásica, excitado com maior nível de tensão (110 volts).

CONCLUSÕES

Conclusões

Ao final desse estudo, observou-se que:

- Considerando como base uma saturação de água conata de 30% no reservatório e a salinidade da água em 400ppm, foi avaliada a recuperação primária do modelo base, constatando-se que foram recuperados 28.476 m³ STD de óleo, servindo este valor de referência para as etapas seguintes.

- Quando aplicado o aquecimento resistivo na configuração monofásica, com 110 volts, ao reservatório com 30% de saturação de água conata e salinidade de 400ppm, verificou-se um aumento de 121,88% na produção de óleo. Esse aumento na produção de óleo aconteceu porque o calor introduzido no sistema, pela passagem de corrente elétrica, provocou uma redução na viscosidade do óleo, bem como a expansão dos fluidos e rochas. Os íons existentes na água são facilitadores nesse processo, que acaba penalizado à medida que a água do reservatório vai sendo produzida.

- Nas simulações, a salinidade da água do reservatório interfere nesse processo positivamente, em termos da condutividade elétrica, mas também negativamente, em termos do aumento da viscosidade da água em função da salinidade. Entretanto, verificou-se que o efeito positivo é predominante, uma vez que a recuperação de óleo aumentou à medida que a salinidade foi incrementada, no tempo de projeto.

- Por outro lado, verificou-se uma tendência de convergência para a produção de óleo, ao final do tempo de projeto e nas três salinidades adotadas, que poderia ser investigada se o tempo de projeto fosse aumentado. Essa tendência pode ser confirmada pelo fato das vazões de óleo se inverterem no sétimo ano de projeto, mesmo ficando em um patamar semelhante, passando o reservatório de maior salinidade a produzir com a menor vazão de óleo.

- Na comparação das respostas para as diferentes salinidades também foi observado que o consumo de energia cresce com o aumento da salinidade da água, embora as curvas também apresentem tendência de convergência no tempo de projeto. É possível que a produção da água salgada, sem reposição (injeção), comprometa a condução de corrente no meio poroso. Essa tendência também poderia ser avaliada com estudos futuros em maiores tempos de projeto.

- Através da análise de sensibilidade, verificou-se que, individualmente, o nível de tensão elétrica aplicado aos eletrodos é a variável mais influente, com impacto positivo no incremento do fator de recuperação, para todos os intervalos avaliados.

- Na avaliação das interações dos parâmetros, verificou-se, em todos os intervalos de tempo avaliados, que a adoção da configuração de alimentação trifásica (uma tensão de defasagem nula e dois pares de tensões com 120° e 240°), combinada com a aplicação do nível mais elevado de tensão, em um reservatório com maior saturação de água conata e maior teor de salinidade da água, resulta na maximização do fator de recuperação.

- A análise de sensibilidade foi suficiente para verificar as condições operacionais e de reservatório que favorecem o incremento no fator de recuperação, entretanto, do ponto de vista empresarial, essas informações deveriam ser complementadas por uma avaliação econômica, para que um investimento fosse eventualmente considerado. Por esse motivo, sugere-se a realização de uma avaliação econômica como um estudo futuro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Referências Bibliográficas

ANTONY, J. *Design of experiments*. Burlington: Elsevier Science & Technology Books, 2003.

ARAÚJO, E. A. *Estudo do processo de combustão in-situ usando poços horizontais como produtores de óleo (Toe-to-Heel Air Injection)*. 2012. 113f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Petróleo), Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. *Planejamento e otimização de experimentos*. 2.ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 1996.

CALADO, V.; MONTGOMERY, D. *Planejamento de experimentos usando o Statistica*. Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais, 2003.

CARRIZALES, M. A. *Recovery of stranded heavy oil by electromagnetic heating*. 2010. 190f. Dissertation (Ph. D.) – Faculty of the Graduate School, University of Texas at Austin.

CURTIS, C.; KOPPER, R.; DECOSTER, E.; GUZMÁN-GARCIA, A.; HUGGINS, C.; KNAUER, L.; MINNER, M.; KUPSCH, N.; LINEARES, L. M.; ROUGH, H.; WAITE, M. Heavy-oil reservoirs. In: SCHLUMBERGER. **Oilfield review**, v.14, n.2, p.30-51, 2002.

HASCAKIR, B.; BABADAGLI, T.; AKIN, S. Experimental and numerical modeling of heavy-oil recovery by electrical heating. In: INTERNATIONAL THERMAL OPERATIONS AND HEAVY OIL SYMPOSIUM, 2008, Calgary. Disponível em: <<http://www.onepetro.org/mslib/servlet/onepetropreview?id=SPE-117669-MS>>. Acesso em: 14 Novembro 2013.

KOVSCHEK, A. R. Emerging challenges and potential futures for thermally enhanced oil recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v.98-99, p.130-143, 2012.

MARINHO, M. R. M.; CASTRO, W. B. Planejamento fatorial: uma ferramenta poderosa para os pesquisadores. In: XXXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 2005, Campina Grande. Disponível em: <<http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2005/artigos/PB-5-61001198468-1118313321435.pdf>>. Acesso em: 03 Dezembro 2013.

MATA, W. *Recuperation assistee des petroles visqueux par ondes electromagnetiques*. 1993. 172f. These (Docteur), Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse.

MEDEIROS, E. J. R. *Estudo do aquecimento geral indireto como método de recuperação avançada de petróleo*. 2012. 257f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Petróleo), Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

OGLU, F. H. N. *Electromagnetic heating methods for heavy oil reservoirs*. 2007. 67f. Thesis (M.Sc. in Petroleum Engineering and Management), School of Architecture, Engineering & Applied Sciences, Baku.

OLIVEIRA, H. J. M. *Estudo paramétrico da recuperação de petróleo pesado por aquecimento eletromagnético resistivo*. 2009. 127f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Petróleo), Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

PERASER, V.; PATIL, S. L.; KHATANIAR, S.; DANDEKAR, A. Y.; SONWALKAR, V. S. Evaluation of electromagnetic heating for heavy oil recovery from Alaskan Reservoirs. In: SPE WESTERN REGIONAL MEETING, 2012, Bakersfield. Disponível em: <<http://www.onepetro.org/mslib/servlet/onepetropreview?id=SPE-154123-MS>>. Acesso em: 12 Novembro 2013.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. *Planejamento de experimentos e otimização de processos: uma estratégia sequencial de planejamentos*. Campinas: Casa do Pão Editora, 2005.

SAHNI, A.; KUMAR, M.; KNAPP, R. Electromagnetic heating methods for heavy oil reservoirs. In: SPE/AAPG WESTERN REGIONAL MEETING, 2000, Long Beach. Disponível em: <<http://www.onepetro.org/mslib/servlet/onepetropreview?id=00062550>>. Acesso em: 12 Novembro 2013.

SANTOS, M. D. *Um modelo matemático baseado em wavelets para análise do método térmico de recuperação de óleo pesado aplicando irradiação eletromagnética*. 2010. 82f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Petróleo), Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

SCHLUMBERGER. *Log interpretation charts*. 2009. Disponível em: <http://www.slb.com/resources/publications/books/log_charts.aspx>. Acesso em: 20 Novembro 2013.

SIERRA, R.; TRIPATHY, B.; BRIDGES, J. E.; FAROUQ ALI, S. M. Promising progress in field application of reservoir electrical heating methods. In: SPE INTERNATIONAL THERMAL OPERATIONS AND HEAVY OIL SYMPOSIUM, 2001, Margarita. Disponível em: <<http://www.onepetro.org/mslib/app/Preview.do?paperNumber=00069709&societyCode=SPE>>. Acesso em: 22 Novembro 2013.

ANEXOS

Anexo I. Curvas de Resistividade de Soluções Aquosas de NaCl

