



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA – CT

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO – DPET



CURSO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO – CEP

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA MODELAGEM MATEMÁTICA
DO CÁLCULO TÉRMICO NO MÉTODO BCS COM SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL**

Hannah Lícia Cruz Galvão

Orientadora: Prof. Dra. Carla Wilza Souza de Paula Maitelli

Mai de 2014

HANNAH LÍCIA CRUZ GALVÃO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA MODELAGEM MATEMÁTICA
DO CÁLCULO TÉRMICO NO MÉTODO BCS COM SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Grau em Engenharia de Petróleo pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Aprovado em ____ de _____ de 2014.

Prof. Dra. Carla Wilza Souza de Paula Maitelli
Orientadora – UFRN

Prof. Dr. Rutácio de Oliveira Costa
Membro Examinador – UFRN

Prof. Dra. Vanessa Cristina Santanna
Membro Examinador – UFRN

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais,
Cláudia e José Edson, ao meu irmão, Edson Loiz,
e à minha orientadora, Carla Maitelli.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pelo dom da vida, por me dar forças nos momentos de maior dificuldade e as várias graças alcançadas no decorrer da caminhada.

A toda minha família, em especial meu pai, minha mãe e meu irmão pelo incentivo, apoio e carinho.

À minha orientadora, Prof. Dra. Carla Wilza Souza de Paula Maitelli, por aceitar guiar meus passos nos momentos mais difíceis da caminhada, por seus ensinamentos, pela confiança depositada em mim e seus conselhos.

Ao Prof. Dr. Rutácio de Oliveira Costa, pelo incentivo e dedicação prestada desde o início da graduação.

À Prof. Dra. Vanessa Cristina Santanna, por seus ensinamentos, pela confiança depositada em mim e disponibilidade.

Ao Prof. Dr. André Laurindo Maitelli, pelo incentivo e auxílio na tomada de decisões ao longo do tempo.

Aos meus queridos amigos, em especial Anthony Diniz e Tatiane Santos pelo companheirismo, parceria, pelos momentos de dificuldade superados juntos.

Aos meus companheiros de pesquisa, Gabriel Bessa e Diogo Pocrifka, por toda parceria e empenho, sempre atuando para que pudéssemos entregar os nossos melhores resultados.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Petróleo, pelos valiosos ensinamentos e conhecimento compartilhado.

Aos meus amigos, que contribuíram de forma direta e indiretamente para meu crescimento nessa árdua caminhada.

À Petrobras e ao PRH PB-221 pelo apoio financeiro.

Ao Laboratório de Automação em Petróleo (LAUT/UFRN), pela parceria para o desenvolvimento da pesquisa.

RESUMO

Este trabalho descreve e apresenta uma modelagem matemática da transferência de calor para os sistemas de elevação por Bombeio Centrífugo Submerso (BCS), tanto para fluxo monofásico como para multifásico. O BCS é um método de elevação artificial, que tem como vantagem fornecer altas vazões e apresentar bom desempenho em poços que possuem elevado BSW, tanto em ambientes terrestres como marítimos. Estimar os efeitos da temperatura no comportamento de um poço que opera por BCS é imprescindível, uma vez que a troca de calor deverá interferir tanto nas características do fluido em escoamento como no comportamento do motor, cabos e da bomba, afetando o sistema como um todo. A metodologia adotada para o estudo considerou o gradiente geotérmico e a transmissão de calor entre motor e os fluidos de produção. O gradiente geotérmico representa o aumento da temperatura do meio devido ao gradual aumento da profundidade. No caso da transmissão de calor entre motor e os fluidos de produção determinam-se as variações nas temperaturas do motor e do fluido, que ocorrem quase que totalmente através do processo de convecção forçada, em função das altas vazões disponibilizadas por este sistema de elevação. Os dados obtidos foram comparados com um programa comercial utilizado na indústria e com dados de campo obtidos de poços equipados com sensores de fundo. Estes se mostraram coerentes e satisfatórios nas duas situações. Com análise dos resultados obtidos para o cálculo térmico em sistemas BCS é possível verificar se os equipamentos estão trabalhando de forma adequada, principalmente aqueles que estão diretamente relacionados ao sistema elétrico, tais como, cabo e motor. Além disso, de posse desses resultados, pode-se desenvolver estudos voltados para reduzir quantitativamente os efeitos nocivos ocasionados pelas altas temperaturas, objetivando aumentar a eficiência do sistema como um todo.

Palavras-chave: Elevação Artificial, Bombeio Centrífugo Submerso, Cálculo Térmico.

ABSTRACT

This work presents and describes a mathematical model of heat transfer to the Electrical Submersible Pumping systems (ESP), both for monophasic and multiphase flow. The ESP is an artificial lift method that has the advantage of providing high flows and presenting a good performance in wells with high BSW, for both onshore and offshore environments. Estimating the effects of temperature in a well operating with ESP is necessary, once the heat exchange can interfere in the fluid characteristics, motor behavior, cables and pump, affecting the whole system. The methodology adopted in this study considered the geothermal gradient and heat transfer between motor and produced fluids. The geothermal gradient represents how the temperature inside the well increases as the depth increases. In the case of heat transfer between motor and fluid, temperature changes are calculated to motor and fluid. These temperature variations occur mostly because of forced convection, due to the high flow rates made available by this artificial lift method. The obtained results were compared with a commercial software used in oil industry and with field data obtained from wells equipped with bottom-hole sensors. These were similar and satisfactory in both situations. With analysis of the obtained results to the thermal calculation in ESP systems is possible to verify if the equipment are working according to their specification, mainly those related to the electrical system, such as cable and motor. Furthermore, those results can be useful for developing new studies focused on reducing harmful effects caused by the high temperatures, in order to increase the whole system efficiency.

Keywords: Artificial Lift, Electrical Submersible Pumping, Thermal Calculation.

Sumário

1. Introdução.....	15
1.1 Objetivo Geral.....	17
1.1.1 Objetivos específicos	18
2. Aspectos Teóricos	20
2.1 Propriedades dos Fluidos	20
2.1.1 Massa específica da mistura (ρ_m).....	20
2.1.2 Viscosidade da mistura (μ_m).....	22
2.1.3 Calor específico da mistura (C_{pm}).....	24
2.1.4 Condutividade térmica da mistura (K_m).....	25
2.2 Transferência de Calor	27
2.2.1 Condução	27
2.2.2 Convecção	28
2.2.3 Radiação	28
2.3 Números Adimensionais	29
2.3.1 Número de Reynolds	29
2.3.2 Número de Prandtl.....	30
2.3.3 Número de Nusselt	30
2.4 Coeficiente Global de Transmissão de Calor por Convecção	31
2.4.1 Coeficiente global de transmissão de calor por convecção para o regime laminar.....	31
2.4.2 Coeficiente global de transmissão de calor por convecção para o regime transiente.	32
2.4.3 Coeficiente global de transmissão de calor por convecção para o regime turbulento.	32
2.5 Temperaturas do Sistema.....	33
3. Metodologia e Desenvolvimento da Modelagem Matemática.....	35
3.1 Simulador BCS	35
3.2 Transferência de Calor no Sistema BCS.....	35
4. Resultados e Discussões.....	39
4.1 Comparação com Dados de Campo de Poços Equipados com Sensores de Fundo.	39

4.2	Comparação com Dados do Programa Comercial e com Dados de Campo de um Poço Equipado com Sensores de Fundo	42
5.	Conclusão	46
5.1	Publicações e Submissão	47
	Referências Bibliográficas	49

Lista de Figuras

Figura 1. Sistema BCS	16
Figura 2. Modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação.....	27
Figura 3. Esquema simplificado da modelagem realizada para o cálculo térmico.....	36

Lista de Tabelas

Tabela 1. Limites de variação para caracterizar cada regime de fluxo.....	37
Tabela 2. Parâmetros de entrada (comparação com os dados de campo).....	40
Tabela 3. Comparativo entre os resultados obtidos pela modelagem matemática desenvolvida e o sensor de fundo.	41
Tabela 4. Desvio padrão das temperaturas do motor registradas por sensores de fundo.....	41
Tabela 5. Parâmetros de entrada (comparação de dados de campo com os do simulador comercial).	43
Tabela 6. Comparativo entre os resultados obtidos pela modelagem desenvolvida, pelo simulador comercial e pelo sensor de fundo.	44

Lista de Símbolos e Abreviaturas

API – grau API (adimensional)

A_c – área de contato entre o motor e a superfície (m^2)

A_{motor} – área do motor (m^2)

B_o – fator volume formação do óleo (bbl/stbo)

B_w – fator volume formação da água (bbl/stbo)

C_{pm} – calor específico da mistura (J/Kg K)

C_{pl} – calor específico do líquido (J/Kg K)

C_{po} – calor específico do óleo (btu/lbm °F)

C_{pw} – calor específico da água (btu/lbm °F)

C_{pg} – calor específico do gás (J/Kg K)

C_{pmet} – calor específico do metano (btu/lbm °F)

C_{peta} – calor específico do etano (btu/lbm °F)

D_{hm} – diâmetro hidráulico do motor (m)

f – fator de fricção (adimensional)

f_w – fração de água (adimensional)

f_{met} – fração de metano (adimensional)

f_o – fração de óleo (adimensional)

$Grad_{geo}$ – gradiente geotérmico (°C/m)

h_c – coeficiente global de transmissão de calor por convecção ($W/m^2 °C$)

H_l – fração de volume de líquido (adimensional)

K_m – condutividade térmica da mistura ($W/m °C$)

K_l – condutividade térmica do líquido ($W/m °C$)

K_o – condutividade térmica do óleo (btu/h ft °F)

K_w – condutividade térmica da água (btu/h ft °F)

K_g – condutividade térmica do gás ($W/m °C$)

L – profundidade da bomba (m)

N_{Re} – número de Reynolds (adimensional)

N_u – número de Nusselt (adimensional)

PM_g – peso molecular aparente do gás (g/mol)

P – pressão do sistema (Psi)

$P_{inversão}$ – Ponto de inversão da emulsão

P_g – pressão do gás (Psia)
 P_{pc} – pressão pseudocrítica do gás (Psi)
 P_r – número de Prandtl (adimensional)
 q_c – fluxo de calor por convecção (W)
 q_l – vazão de líquido (ft³/s)
 q_g – vazão de gás (ft³/s)
 Q_{motor} – calor gerado pelo motor (W)
 RGO – razão gás-óleo (m³/m³)
 Rs – razão de solubilidade (scf/stbo)
 T – temperatura do sistema (°F)
 T_g – temperatura do gás (°R)
 T_{pr} – temperatura pseudoreduzida do gás (adimensional)
 T_{pc} – temperatura pseudocrítica do gás (°R)
 T_S – temperatura de superfície (°C)
 T_f – temperatura média do fluido em torno da fonte de calor (°C)
 ΔT_{motor} – variação da temperatura interna do motor (°C)
 ΔT_{fluido} – variação da temperatura do fluido (°C)
 ΔT_{grad} – variação da temperatura do gradiente geotérmico (°C)
 T_F – temperatura final na carcaça do motor (°C)
 V – velocidade do fluido (m/s)
 V_{mass} – vazão mássica (Kg/s)
 $Valor_{Comercial}$ – resultado obtido pelo programa comercial
 $Valor_{Desenvolvido}$ – resultado obtido pela modelagem desenvolvida
 $Valor_{Sensor}$ – resultado obtido pelo sensor de fundo
 Z – fator de compressibilidade do gás (1/Psi)

Letras gregas

ρ_m – massa específica da mistura gás-líquido (lbm/ft³)
 ρ_l – massa específica da fase líquida (lbm/ft³)
 ρ_o – massa específica do óleo (lbm/ft³)
 ρ_w – massa específica da água (lbm/ft³)
 ρ_g – massa específica do gás (lbm/ft³)
 μ_m – viscosidade dinâmica da mistura gás-liquido (cP)

μ_l – viscosidade dinâmica da fase líquida (cP)

μ_f – viscosidade dinâmica do fluido em contato com o motor (cP)

μ_o – viscosidade dinâmica do óleo (cP)

μ_{om} – viscosidade dinâmica do óleo morto (cP)

μ_w – viscosidade dinâmica da água (cP)

μ_g – viscosidade dinâmica do gás (cP)

γ_o – densidade relativa do óleo (adimensional)

γ_w – densidade relativa da água (adimensional)

γ_g – densidade relativa do gás (adimensional)

γ_{gd} – densidade relativa do gás dissolvido (adimensional)

γ_l – densidade relativa do líquido (adimensional)

Capítulo 1

Introdução

1. Introdução

Desde a antiguidade, o petróleo é considerado uma das principais fontes de substâncias úteis ao homem e durante o século XX tornou-se a mais importante, proporcionando o desenvolvimento industrial de muitas nações. Atualmente, com o advento de novas descobertas de reservas e aumento da demanda, a indústria petrolífera desencadeou no mercado uma constante busca por novas tecnologias que auxiliassem na maximização da produção de fluidos da maneira mais econômica e viável possível.

O Bombeio Centrífugo Submerso (BCS) é um método de elevação artificial proposto pelo russo Armais Arutunoff, na década de 1910. Atualmente, destaca-se por ter uma grande aplicabilidade em águas profundas, caracterizado por fornecer altas vazões de líquido e apresentar bom desempenho em poços que possuem elevado BSW. Com a evolução dos equipamentos e, conseqüentemente, a melhoria da confiabilidade do sistema, a aplicação do BCS em poços terrestres (*onshore*) e marítimos (*offshore*) tem ganhado destaque.

O sistema BCS é constituído por um conjunto de equipamentos de superfície e subsuperfície. De maneira mais geral, os componentes de superfície são: quadro de comandos, transformadores, caixa de ventilação, cabeça de produção e fonte de energia elétrica. Na subsuperfície, os principais componentes são o motor elétrico, o protetor, a bomba, o cabo e a coluna de produção. O esquema de um sistema típico BCS é apresentado de acordo com a Figura 1.

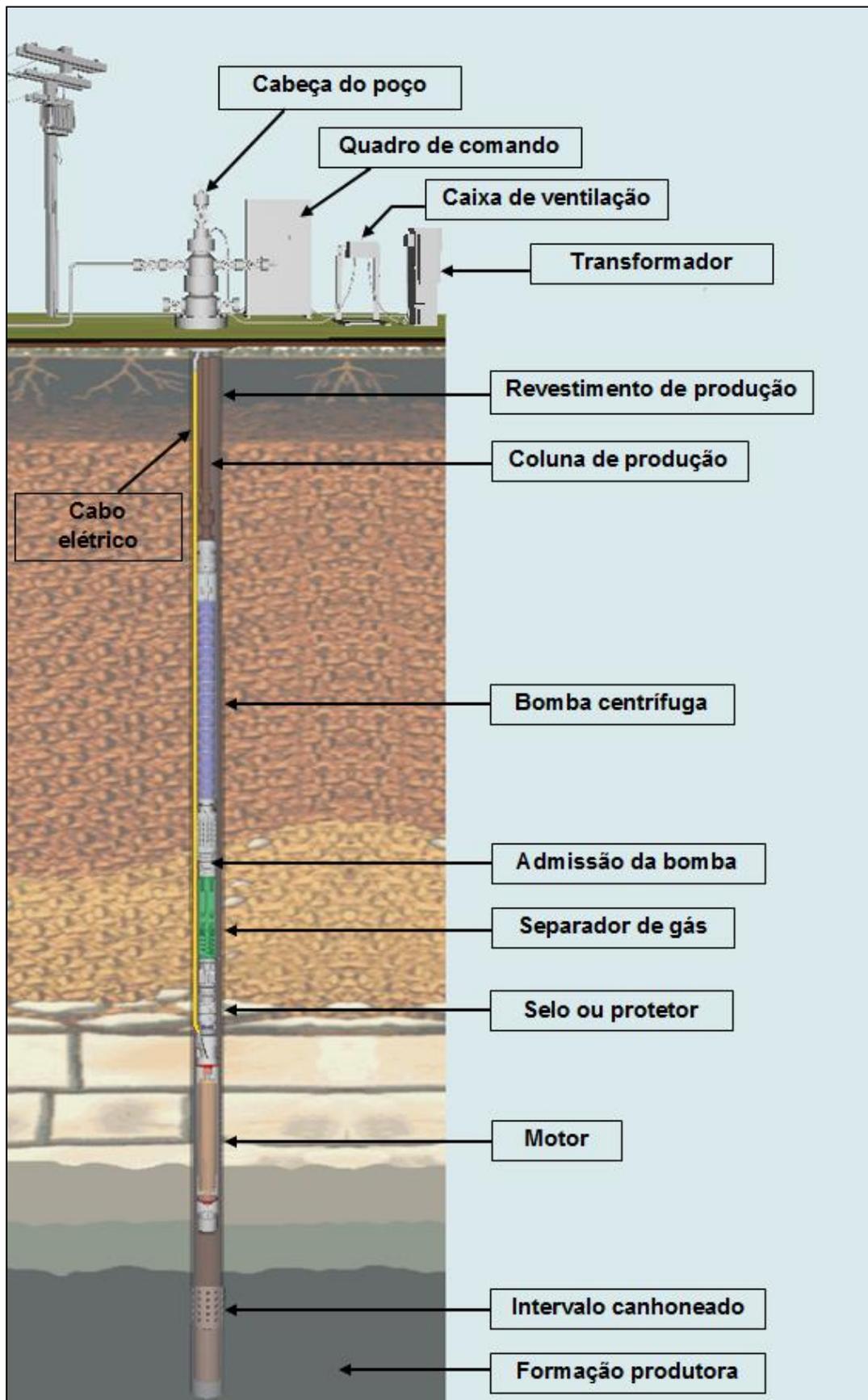


Figura 1. Sistema BCS.

Fonte: Oliva (2013).

No BCS a energia é transmitida para o fundo do poço através de um cabo elétrico. A energia elétrica é transformada em energia mecânica por um motor elétrico de subsuperfície, o qual está conectado a uma bomba centrífuga de múltiplos estágios. Esta, por sua vez, transmite a energia para o fluido sob a forma de pressão, elevando-o para a superfície. Nesse sistema, evita-se a contaminação do óleo do motor pelos fluidos de produção através do sistema de selagem mecânica, que existe entre a bomba e o motor. O selo protetor também atua suportando o esforço axial transmitido pelo eixo da bomba e promovendo volume adicional necessário para armazenar a expansão do óleo do motor gerado pelo calor.

A análise do cálculo térmico no método BCS tornou-se imprescindível, visto que, durante o processo de operação, ocorre troca de calor entre seus componentes e o ambiente. A troca de calor interfere tanto nas características do fluido em escoamento como no desempenho dos equipamentos que constituem o sistema, como o motor, os cabos e a bomba, podendo causar danos e perda de eficiência no processo.

Nesse contexto, foi desenvolvida uma modelagem matemática da transferência de calor em um sistema BCS, tanto para fluxo monofásico como para multifásico, que simula as perdas de calor do sistema, determinando as temperaturas do fluido, do motor e do gradiente geotérmico. Com a análise dessa perda, é possível realizar uma avaliação dos efeitos da temperatura e encontrar métodos que diminuam a ocorrência de situações indesejadas, possibilitando otimizar o sistema.

Este trabalho está dividido em 5 capítulos, o primeiro referente à introdução e objetivos, o segundo aborda os aspectos teóricos fundamentais para a realização do trabalho. Posteriormente, é apresentada a metodologia e o desenvolvimento da modelagem matemática, seguido dos resultados e discussões, conclusão e, por fim, as referências bibliográficas.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma modelagem matemática da transferência de calor em um sistema BCS, tanto para fluxo monofásico como para multifásico. Esta deve simular as perdas de calor do sistema, comparando os resultados com aqueles obtidos por um programa comercial utilizado na indústria do petróleo e, também, com poços reais equipados com sensores de fundo.

1.1.1 Objetivos específicos

Dentre os objetivos específicos destacam-se:

- Desenvolvimento de uma metodologia de cálculo térmico no motor em sistemas BCS;
- Determinação do coeficiente global de transmissão de calor para cara regime de escoamento;
- Determinação das temperaturas do fluido, do motor e do gradiente geotérmico;
- Simulações para a validação da modelagem matemática desenvolvida.

Capítulo 2

Aspectos Teóricos

2. Aspectos Teóricos

Nesta seção, foram abordados os principais tópicos com embasamento teórico, fundamentais para o entendimento e o desenvolvimento dos procedimentos realizados para evolução e efetivação do trabalho.

2.1 Propriedades dos Fluidos

Durante o processo de operação do sistema BCS ocorre troca de calor entre os equipamentos que o constituem e o ambiente. A perda de calor para o meio interfere diretamente nas propriedades físicas do fluido em escoamento, tais como: massa específica, viscosidade, calor específico da mistura e condutividade térmica. Para calculá-las, faz-se necessário o conhecimento de alguns parâmetros do fluido em escoamento.

A seguir serão apresentadas equações fundamentais para determinar as propriedades físicas do fluido em escoamento, bem como as demais variáveis envolvidas no processo do cálculo térmico no método BCS.

2.1.1 Massa específica da mistura (ρ_m)

A massa específica da mistura corresponde a uma ponderação das frações da massa específica do líquido (ρ_l) e do gás (ρ_g) presentes na mistura, descrita pela Equação 1.

$$\rho_m = \rho_l \cdot H_l + \rho_g \cdot (1 - H_l) \quad (1)$$

Em que H_l representa a fração do volume de líquido presente no sistema, determinado pela relação das vazões de fluidos envolvidos no processo, como mostra a Equação 2.

$$H_l = \frac{q_l}{q_l + q_g} \quad (2)$$

Para se determinar a massa específica do líquido é necessário conhecer os valores da massa específica do óleo (ρ_o) e da água (ρ_w), uma vez que essa propriedade também resulta de uma ponderação das frações de óleo e de água presentes no sistema, de acordo com a Equação 3.

$$\rho_l = \rho_o \cdot f_o + \rho_w \cdot f_w \quad (3)$$

As frações de água e de óleo são obtidas segundo as Equações 4 e 5.

$$f_w = \frac{BSW}{100} \quad (4)$$

$$f_o = 1 - f_w \quad (5)$$

A massa específica do óleo é obtida em função de quatro parâmetros: a densidade relativa do óleo (γ_o), a densidade relativa do gás dissolvido (γ_{gd}), o fator volume formação do óleo (B_o) e a razão de solubilidade (R_s). Ela é descrita conforme a Equação 6 (BRILL; MUKHERJEE, 1999).

$$\rho_o = (62,4 \cdot \gamma_o) + \frac{(0,0136 \cdot R_s \cdot \gamma_{gd})}{B_o} \quad (6)$$

Em que a densidade relativa do gás dissolvido é definida de acordo com a Equação 7, para os valores admitidos da mesma no intervalo $[0,56; \gamma_g]$.

$$\gamma_{gd} = \left(\frac{(API + 12,5)}{50} \right) - \left(3,571 \cdot \frac{(API \cdot R_s)}{e^6} \right) \quad (7)$$

Os parâmetros B_o e R_s podem ser obtidos através das correlações de Standing, Vasquez, Glaso e Trijana. No entanto, para o trabalho em estudo, utilizou-se as correlações de Standing para determinar os valores do fator volume formação do óleo e da razão de solubilidade, através das Equações 8 e 9, respectivamente (STANDING, 1981).

$$B_o = 0,972 + 0,0000147 \cdot \left(R_s \cdot \left(\frac{\gamma_{gd}}{\gamma_o} \right)^{0,5} + 1,25 \cdot T \right)^{1,175} \quad (8)$$

$$R_s = \gamma_o \cdot \left[\left(\frac{P}{18,2} + 1,4 \right) 10^{0,0125 \cdot API - 0,00091 \cdot T} \right]^{1,2048} \quad (9)$$

A massa específica da água pura em condições padrão corresponde a 62,4 lbm/ft³. Desprezando a solubilidade do gás na água, a massa específica é obtida a partir da Equação 10 (BRILL; MUKHERJEE, 1999).

$$\rho_w = \frac{(62,4 \cdot \gamma_w)}{B_w} \quad (10)$$

Na qual o fator volume formação da água (B_w) corresponde a Equação 11 (GOULD, 1974):

$$B_w = 1 + (1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (T - 60)) + (1,0 \cdot 10^{-6} \cdot (T - 60)^2) + (-3,33 \cdot 10^{-6} \cdot P) \quad (11)$$

A massa específica do gás é determinada através da combinação da lei dos gases reais juntamente com a definição da densidade relativa do gás, de acordo com a Equação 12 (BRILL; MUKHERJEE, 1999).

$$\rho_g = 2,7 \cdot \gamma_g \cdot \left(\frac{P_g}{Z \cdot T_g} \right) \quad (12)$$

Ressalta-se que a densidade relativa do gás livre é uma função da pressão e da temperatura, visto que depende da composição e da quantidade de gás transferido entre o líquido e a fase gás livre.

2.1.2 Viscosidade da mistura (μ_m)

A viscosidade é uma grandeza física mensurável relacionada à resistência do fluido em escoamento, que correlaciona às tensões locais em um fluido em movimento com a taxa de deformação de elemento fluido. Em uma mistura multifásica, a viscosidade não pode ser prevista com precisão, uma vez que cada fase tem algum efeito sobre a mesma. Para o cálculo da viscosidade da mistura, há a possibilidade de se escolher em qual opção deseja-se determinar a viscosidade, considerando emulsão ou não. No entanto, para o caso em estudo, optou-se em considerar um sistema com

presença de emulsão. Sendo assim, a viscosidade da mistura é obtida a partir da Equação 13 (BROWN; BEGGS, 1977).

$$\mu_m = \mu_l \cdot H_l + \mu_g \cdot (1 - H_l) \quad (13)$$

Para calcular a viscosidade do líquido quando se considera emulsão é necessário definir o ponto de inversão da emulsão, conforme mostra a Equação 14.

$$P_{inversão} = 0,5 - (0,1108 \cdot \log(\mu_o)) \quad (14)$$

Se o valor do ponto de inversão da emulsão for maior que a fração de água a viscosidade do líquido é determinada considerando emulsão água em óleo (A/O), conforme a Equação 15.

$$\mu_l = \mu_o \cdot (1 + 2,5 \cdot f_w + 14,1 \cdot (f_w)^2) \quad (15)$$

Caso contrário, é considerada a emulsão óleo em água (O/A) para o cálculo da viscosidade do líquido, descrita pela Equação 16.

$$\mu_l = \mu_w \cdot (1 + 2,5 \cdot f_o + 14,1 \cdot (f_o)^2) \quad (16)$$

Correlações como Chew & Connaly e Beggs & Robinson são aplicadas para o cálculo da viscosidade do óleo com gás em solução. Neste estudo, a correlação utilizada é a de Beggs & Robinson, descrita pela Equação 17 (BEGGS; ROBINSON, 1975).

$$\mu_o = 10,715 \cdot (R_s + 100)^{-0,515} \cdot (\mu_{om}^{5,44 \cdot (R_s + 150)^{-0,338}}) \quad (17)$$

A viscosidade do óleo morto (μ_{om}) presente na Equação 17 é definida na pressão atmosférica e em uma temperatura fixa do sistema sem gás dissolvido. Em seguida, esta viscosidade é corrigida para a condição de pressão do sistema. A viscosidade do óleo morto (μ_{om}) pode ser calculada através das correlações de Interpolação, Beal, Beggs & Robinson, Egbogah, Beggs & Robinson Modificada, Glaso & Singh e outros. Nos exemplos posteriormente expostos é considerada a de Beal segundo a Equação 18 (BEAL, 1946).

$$\mu_{om} = \left(0,32 + \left(\frac{1,8 \cdot 10^7}{API^{4,53}} \right) \right) \cdot \left(\frac{360}{T_{\circ R} - 60} \right)^{100,43 + \frac{8,33}{API}} \quad (18)$$

Quanto à água, a viscosidade é descrita conforme a Equação 19 (VAN WINGEN, 1950).

$$\mu_w = e^{(1,003-1,479 \cdot 10^{-2} \cdot (T)+1,982 \cdot 10^{-5} \cdot (T^2))} \quad (19)$$

A viscosidade do gás, em centipoise, é calculada a partir da correlação de escoamento multifásico de Lee, Gonzalez e Eakin (1966), que utiliza a densidade relativa do gás (γ_g) e o peso molecular aparente do gás (PM_g), representada na Equação 20.

$$\mu_g = \left(\frac{9,4 + 0,02 \cdot PM_g \cdot \gamma_g \cdot T_{\circ R}^{1,5}}{209 + (19 \cdot PM_g \cdot \gamma_g) + T_{\circ R}} \right) \cdot 10^{-4} \cdot A \quad (20)$$

Onde:

$$A = e^{\left(3,5 + \frac{986}{T_{\circ R}} + 0,01 \cdot PM_g \cdot \gamma_g \cdot \left(\frac{\rho_g}{64,4} \right)^{24 - \left(0,2 \cdot 3,5 + \frac{986}{T_{\circ R}} \right) + (0,01 \cdot PM_g \cdot \gamma_g)} \right)} \quad (21)$$

2.1.3 Calor específico da mistura (C_{pm})

O calor específico é uma grandeza física que define a variação térmica de uma substância ao receber determinada quantidade de calor. É uma propriedade que caracteriza uma substância em determinado estado físico. O calor específico de uma mistura é descrito conforme a Equação 22, obtida a partir de uma média aritmética envolvendo a massa específica do líquido, o calor específico do líquido, a massa específica do gás e o calor específico do gás.

$$C_{pm} = \left(\frac{C_{pl} \cdot \rho_l \cdot H_l + C_{pg} \cdot \rho_g \cdot (1 - H_l)}{\rho_l \cdot H_l + \rho_g \cdot (1 - H_l)} \right) \quad (22)$$

Por sua vez, o calor específico da fase líquida é obtido através de uma média que relaciona tanto as densidades relativas quanto as capacidades caloríficas do óleo e da água, conforme apresenta a Equação 23.

$$C_{pl} = \left(\frac{\gamma_w \cdot f_w \cdot C_{pw} + \gamma_o \cdot f_o \cdot C_{po}}{\gamma_l} \right) \quad (23)$$

Para o cálculo do calor específico do óleo, adota-se a correlação de Ganbill (1957), descrita pela Equação 24, visto que é conhecido o grau *API*, a densidade do óleo e a temperatura do sistema.

$$C_{po} = \frac{0,388 + 0,00045 \cdot T}{\sqrt{\gamma_o}} \quad (24)$$

Quando se trata da água, o calor específico é determinado em função da temperatura do sistema, referente à Equação 25.

$$C_{pw} = 10^{-11} \cdot T^{-4} - 10^{-8} \cdot T^3 + 4 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 1,024 \quad (25)$$

Por fim, o calor específico do gás é determinado conforme a Equação 26, considerando a predominância de dois gases no sistema, o metano e o etano.

$$C_{pg} = \left[C_{pmet} \cdot f_{met} + C_{peta} \cdot (1 - f_{met}) \right] \cdot \frac{0,999976}{PM_g} \quad (26)$$

Em que a fração de metano (f_{met}) corresponde a:

$$f_{met} = \frac{30 - PM_g}{14} \quad (27)$$

2.1.4 Condutividade térmica da mistura (K_m)

A condutividade térmica é uma propriedade da substância que controla a taxa de transferência de calor por um processo condutivo. A condutividade térmica da mistura é obtida a partir da Equação 28.

$$K_m = K_l \cdot H_l + K_g \cdot (1 - H_l) \quad (28)$$

E para o líquido, é determinada conforme a Equação 29.

$$K_l = K_o \cdot f_o + K_w \cdot f_w \quad (29)$$

A condutividade térmica do óleo diminui com o aumento da temperatura no sistema. Em casos de frações de hidrocarbonetos dos quais se tenha conhecimento prévio da densidade relativa do óleo e temperatura, ela é determinada segundo Cragoe (1929), pela Equação 30.

$$K_o = \frac{1,62 \cdot [1 - 3 \cdot (T - 32) \cdot 10^{-4}]}{\gamma_o} \cdot \frac{1}{24} \quad (30)$$

Quando se trata da água, a condutividade térmica é descrita por uma função polinomial da temperatura, segundo a Equação 31, podendo a temperatura variar entre 32°F e 620°F *apud* Batista (2009).

$$K_w = -4 \cdot 10^{-12} \cdot T^4 + 5 \cdot 10^9 \cdot T^3 - 3 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 0,0009 \cdot T + 0,2997 \quad (31)$$

A condutividade térmica do gás, quando não determinada graficamente, é descrita de acordo com a Equação 32.

$$K_g = 10^{-7} \cdot (14,52 \cdot T_{pr} - 5,14)^{0,66666667} \cdot \left(\frac{C_{pg}}{\left(T_{cp} \cdot 0,56 \right)^{0,66666667} \cdot f_{met}^{0,5} \cdot \lambda} \right) \quad (32)$$

Onde λ :

$$\lambda = \left(\frac{101,325}{P_{cp} \cdot 6,894757} \right)^{0,66666667} \quad (33)$$

A pressão pseudocrítica e a temperatura pseudocrítica foram calculadas pelas equações apresentadas por Standing (1951) *apud* Rosa, Carvalho e Xavier (2006).

$$P_{pc} = 677 + 15 \cdot \gamma_g - 37,5 \cdot \gamma_g^2 \quad (34)$$

$$T_{pc} = 168 + 325 \cdot \gamma_g - 12,5 \cdot \gamma_g^2 \quad (35)$$

2.2 Transferência de Calor

Uma maneira de definir a transferência de calor é considerá-la como uma energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura no espaço. Sempre que existir uma diferença de temperatura em um meio ou entre dois meios, haverá, necessariamente, transferência de calor (INCROPERA *et al.*, 2008). A transferência de calor pode ocorrer por diferentes processos, como condução, convecção e radiação, assim como mostra a Figura 2.

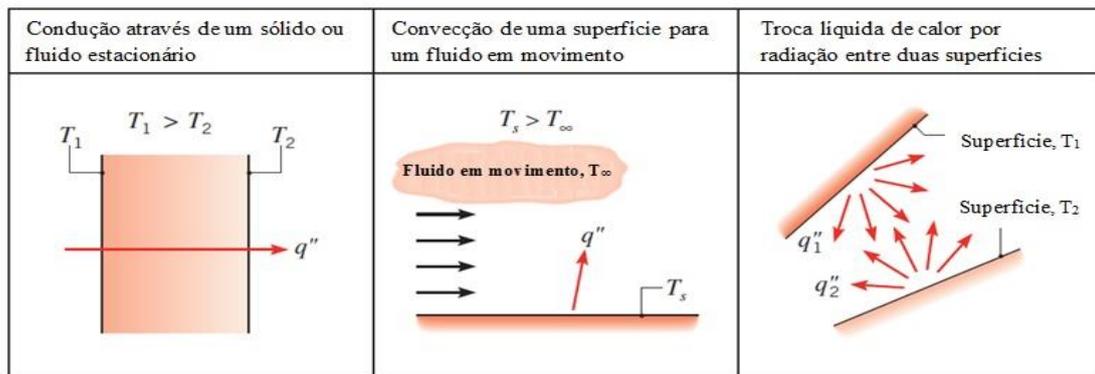


Figura 2. Modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação.

Fonte: Adaptado de Incropera *et al.* (2008).

2.2.1 Condução

A condução pode ser vista como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas de uma substância devido às interações entre elas. Essa energia está relacionada ao movimento de translação aleatório, assim como aos movimentos internos de rotação e de vibração das moléculas (INCROPERA *et al.*, 2008).

As temperaturas mais altas estão associadas às energias moleculares de maiores taxas de calor. Quando as moléculas vizinhas se chocam, o que ocorre constantemente, as moléculas mais energéticas transferem energia para as menos energéticas. Portanto, na presença de um gradiente de temperatura, a transmissão de energia por condução deve ocorrer na direção da diminuição da temperatura.

O processo de transmissão de calor pode ser quantificado através das equações de taxas apropriadas. Essas equações podem ser usadas para calcular a quantidade de

energia sendo transferida por unidade de tempo. No caso da condução térmica, a equação da taxa conhecida é a “Lei de Fourier”, que correlaciona parâmetros como o fluxo térmico, o gradiente de temperatura e a condutividade térmica.

2.2.2 Convecção

A convecção é um modo de transferência de calor que abrange dois mecanismos: a transferência através do movimento global e a transferência devido ao movimento molecular aleatório. No primeiro, o movimento está associado a um grande número de moléculas se movendo coletivamente. No segundo, em virtude das moléculas agregadas manterem seus movimentos aleatórios, a transferência de calor total resulta da superposição do transporte de energia pelo movimento aleatório das moléculas juntamente com o transporte devido ao movimento global do fluido.

É comum utilizar o termo “convecção” para se referir a um transporte cumulativo, e o termo “advecção” para se referir a um transporte devido ao movimento global do fluido. A transferência de calor por convecção pode ser classificada de acordo com a natureza do escoamento do fluido, por convecção natural e/ou convecção forçada.

Na convecção natural, o movimento do fluido é devido às forças de empuxo no seu interior. Na convecção forçada, o movimento é imposto por uma fonte externa (INCROPERA *et al.*, 2008). Nessa condição, a equação apropriada para determinar a taxa de transferência de calor é baseada na expressão conhecida como “Lei do Resfriamento de Newton”. Esta envolve o fluxo de calor por convecção, as diferenças de temperatura entre uma superfície e um fluido e um coeficiente global de transferência de calor por convecção. A lei que rege a convecção forçada é dada pela Equação 36.

$$\frac{q_c}{A_c} = h_c \cdot (T_s - T_f) \quad (36)$$

2.2.3 Radiação

A radiação térmica é a energia emitida pela matéria que se encontra a uma temperatura não nula. Independente da forma da matéria, a emissão pode ser atribuída a

mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas que a constituem. A radiação que é emitida pela superfície tem sua origem na energia térmica da matéria, delimitada pela superfície e pela taxa na qual a energia é liberada por unidade de área (INCROPERA *et al.*, 2008).

A radiação pode ser oriunda de uma fonte especial, tal como o Sol, ou de outras superfícies às quais a superfície de interesse seja exposta. Independente das fontes, a taxa na qual todas essas radiações incidem sobre uma área unitária da superfície é designada por “irradiação”. Em muitos problemas de engenharia, os gases podem ser considerados como transparentes, os líquidos como opacos, e os sólidos como opacos (metais) ou semitransparentes em relação à transferência de calor por radiação.

A taxa líquida de transferência de calor por radiação fornece a diferença entre a energia térmica que é liberada devido à emissão de radiação e aquela que é ganha devido à absorção de radiação.

2.3 Números Adimensionais

Para o estudo do cálculo térmico desenvolvido nesse trabalho, é necessário o conhecimento de parâmetros adimensionais, como número de Reynolds, de Prandtl e de Nusselt. Estes são responsáveis por determinar a variável que corresponde ao coeficiente global de transmissão de calor por convecção, utilizado na equação da transmissão de calor por unidade de tempo entre uma superfície e um fluido.

2.3.1 Número de Reynolds

O número de Reynolds (N_{Re}) é um parâmetro adimensional responsável por determinar o regime de fluxo que o fluido está submetido no interior do poço. Ele relaciona as forças de inércia com as forças viscosas, determinando se o fluido está submetido a um regime de fluxo laminar, turbulento ou transiente. O número de Reynolds é descrito conforme a Equação 37.

$$N_{Re} = \frac{\rho_m \cdot V \cdot D_{hm}}{\mu_m} \quad (37)$$

Em função do tipo de escoamento, o número de Reynolds possui limites de variação para cada regime dentro de faixas estipuladas pela literatura.

2.3.2 Número de Prandtl

O número de Prandtl, que expressa a relação física entre as magnitudes relativas do movimento e a difusão do calor no fluido, depende apenas das propriedades do fluido, de modo que ele apresente apenas uma equação para todos os tipos de regime de fluxo. O número é definido conforme mostra a Equação 38 *apud* Kreith, Manglik e Bohn (2011).

$$P_r = \frac{C_{pm} \cdot \mu_m}{K_m} \quad (38)$$

Nos gases, o número de Prandtl varia de 0,6 a 0,9. Na maioria dos óleos, possuem grandes valores, pois suas viscosidades são altas e suas condutividades térmicas são pequenas.

2.3.3 Número de Nusselt

O número de Nusselt é um parâmetro que promove fisicamente a relação entre o fluxo de calor por convecção e o fluxo de calor por condução no próprio fluido. O seu cálculo é diferenciado para dois tipos de regimes de fluxo. Quando se trata do regime laminar é descrito conforme a Equação 39.

$$N_u = 1,86 \cdot \left(N_{Re} - P_r \cdot \frac{D_{hm}}{L_m} \right)^{0,33} + \left(\frac{\mu_m}{\mu_f} \right)^{0,14} \quad (39)$$

Quando o regime é transiente é definido segundo a Equação 40 *apud* Costa (2012).

$$N_u = \frac{\left(\frac{f}{8} \right) \cdot (N_u - 1000) \cdot P_r}{1 + 12,7 \cdot \left(\frac{f}{8} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(P_r^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} \quad (40)$$

Em que f representa o fator de fricção, descrito pela Equação 41.

$$f = \frac{1}{\left[-2 \cdot \log \left(\left(\frac{K_m}{3.7} \right) - \frac{5.16}{N_{Re}} \cdot \log \left(\frac{5.09}{N_{Re}} + \frac{K_m}{3.7} \cdot \frac{1}{D_{hm}} \right) \right) \right]^2} \quad (41)$$

2.4 Coeficiente Global de Transmissão de Calor por Convecção

De acordo com Kreith (1997), o coeficiente global de transmissão de calor por convecção (h_c) é uma função complexa do fluxo de fluido, das propriedades térmicas do fluido e da geometria do sistema, sendo o seu valor calculado por uma equação empírica, tal como apresentado na Equação 42.

$$h_c = \frac{N_u \cdot K_m}{D_{hm}} \quad (42)$$

Entretanto, na convecção forçada, o coeficiente global de transmissão de calor por convecção é calculado de maneira diferenciada para cada regime de fluxo. Isso ocorre porque esse coeficiente depende dos parâmetros adimensionais citados na subseção anterior, os quais também apresentam diferenciação nos seus cálculos, conforme o tipo de regime em que o fluido em escoamento está submetido.

2.4.1 Coeficiente global de transmissão de calor por convecção para o regime laminar

No regime laminar, o cálculo do coeficiente global de transmissão de calor por convecção é dependente do número de Reynolds, do número de Nusselt e do número de Prandtl. Nesse tipo de fluxo, tanto o número de Reynolds, como de Prandtl são obtidos conforme as Equações 37 e 38, respectivamente. Por sua vez, o número de Nusselt é obtido conforme a Equação 39 e ao substituí-lo na Equação 42, o coeficiente global de transmissão de calor por convecção para este regime passa a ser descrito segundo a Equação 43.

$$h_c = \frac{\left[1,86 \cdot \left(N_{Re} - P_r \cdot \frac{D_{hm}}{L_m} \right)^{0,33} + \left(\frac{\mu_m}{\mu_f} \right)^{0,14} \right] \cdot K_m}{D_{hm}} \quad (43)$$

2.4.2 Coeficiente global de transmissão de calor por convecção para o regime transiente.

Para este tipo de regime, o cálculo do coeficiente global de transmissão de calor por convecção depende de dois dos parâmetros adimensionais utilizados no regime laminar, o número de Prandtl e o de Nusselt. O número de Prandtl é calculado da mesma maneira como mostrado na Equação 38 da subsecção 2.3.2, mas, diferentemente do laminar, o número de Nusselt é obtido segundo a Equação 40. Substituindo o número de Nusselt presente na Equação 42 pela Equação 40, obtém-se o coeficiente global de transmissão de calor por convecção para o fluxo transiente, conforme apresentado pela Equação 44.

$$h_c = \frac{\left[\frac{\left(\frac{f}{8}\right) \cdot (N_{Re} - 1000) \cdot P_r}{1 + 12.7 \cdot \left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(P_r^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \right] \cdot K_m}{D_{hm}} \quad (44)$$

2.4.3 Coeficiente global de transmissão de calor por convecção para o regime turbulento.

No fluxo turbulento, o cálculo do coeficiente global de transmissão de calor por convecção é apenas dependente dos números adimensionais de Reynolds e de Prandtl. O número de Prandtl é calculado a partir da mesma equação matemática utilizada para o regime laminar e transiente, e o coeficiente global de transmissão de calor por convecção passa a ser determinado conforme a Equação 45 (HOLMAN, 2001).

$$h_c = 0,023 \cdot \frac{K_m}{D_{hm}} \cdot N_{Re}^{0.8} \cdot P_r^{0.33} \quad (45)$$

2.5 Temperaturas do Sistema

Neste trabalho, o valor da temperatura final, na carcaça do motor, é resultante do somatório da variação de três parcelas de outras temperaturas determinadas no sistema BCS. São elas: temperatura do gradiente geotérmico, temperatura do fluido e temperatura interna do motor. Essas temperaturas são funções resultantes do gradiente geotérmico do poço e da troca de calor entre o motor e os fluidos de produção.

A variação do gradiente geotérmico mede a relação entre a temperatura num ponto e a profundidade do poço, é uma propriedade característica da rocha. Esse gradiente varia de local para local dependendo do fluxo regional do calor e da condutividade térmica da formação (K_r). O cálculo da variação da temperatura, devido ao gradiente geotérmico, é descrito conforme a Equação 46.

$$\Delta T_{grad} = Grad_{geo} \cdot L + T_s \quad (46)$$

A variação da temperatura interna do motor é obtida conforme a Equação 47, resultante da relação entre o calor gerado pelo motor (Q_{motor}), o coeficiente global de transmissão de calor por convecção (h_c) e a área do motor em contato com o fluido (A_{motor}).

$$\Delta T_{motor} = \frac{Q_{motor}}{h_c \cdot A_{motor}} \quad (47)$$

A variação de temperatura do fluido é determinada em função do calor gerado pelo motor (Q_{motor}), da vazão mássica do fluido (V_{mas}) e do calor específico da mistura (C_{pm}), conforme apresenta a Equação 48.

$$\Delta T_{fluido} = \frac{Q_{motor}}{V_{mass} \cdot C_{pm}} \quad (48)$$

Dessa forma, a temperatura final, na carcaça do motor, é determinada segundo a Equação 49, cujos pontos na mesma profundidade possuem o mesmo valor.

$$T_F = \Delta T_{grad} + \Delta T_{motor} + \Delta T_{fluido} \quad (49)$$

Capítulo 3

Metodologia e Desenvolvimento da Modelagem Matemática

3. Metodologia e Desenvolvimento da Modelagem Matemática

3.1 Simulador BCS

A modelagem do cálculo térmico proposta nesse trabalho foi implementada em um simulador computacional, o Simulador BCS, desenvolvido no Laboratório de Automação em Petróleo (LAUT), na Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

O programa representa e avalia o comportamento dinâmico de poços de petróleo, considerando parâmetros como as propriedades do fluido, o tipo de escoamento, as características dos equipamentos do sistema, entre outros dados de entrada. Após a simulação, o programa fornece ao usuário as variáveis de interesse, tais como: nível dinâmico, tempo para que o poço atinja o regime permanente, altura de elevação, temperatura do motor, vazão, submergência do canhoneado, eficiência da bomba, entre outras.

É possível aplicá-lo em poços direcionais e facilitar as decisões ao projetar e dimensionar sistemas de elevação por BCS. Como principais características do programa, podem ser citadas: simulação dinâmica de poços equipados com BCS, interface com o *Windows* e animações em 3D, comunicação com outras aplicações através de protocolo TCP/IP, comunicação com CLP HI ZAP 900 via porta serial.

3.2 Transferência de Calor no Sistema BCS

No sistema BCS, a transmissão de calor ocorre quase que totalmente através do processo de convecção forçada, quando o escoamento é causado por um meio externo em função das altas vazões disponibilizadas por esse sistema de elevação. A transferência de calor está estreitamente relacionada ao movimento do fluido, o qual depende do modelo de escoamento. O modelo do movimento dos fluidos é baseado nas correlações de escoamento multifásico disponíveis na bibliografia e usuais na indústria do petróleo.

Nesse sistema, a temperatura é uma variável imprescindível, visto que, através dela, analisa-se a perda de calor durante o processo de operação do sistema BCS. As

altas temperaturas interferem tanto nas propriedades dos fluidos, como no desgaste dos equipamentos que constituem o sistema, tais como: cabo, motor, bomba, selo, dentre outros.

A metodologia adotada para o estudo considerou o gradiente geotérmico e a transmissão de calor entre o motor e os fluidos de produção. No caso da transmissão de calor entre o motor e os fluidos de produção, determinaram-se as variações nas temperaturas do motor e do fluido. Um esquema simplificado da modelagem realizada para o cálculo térmico é ilustrada na Figura 3.

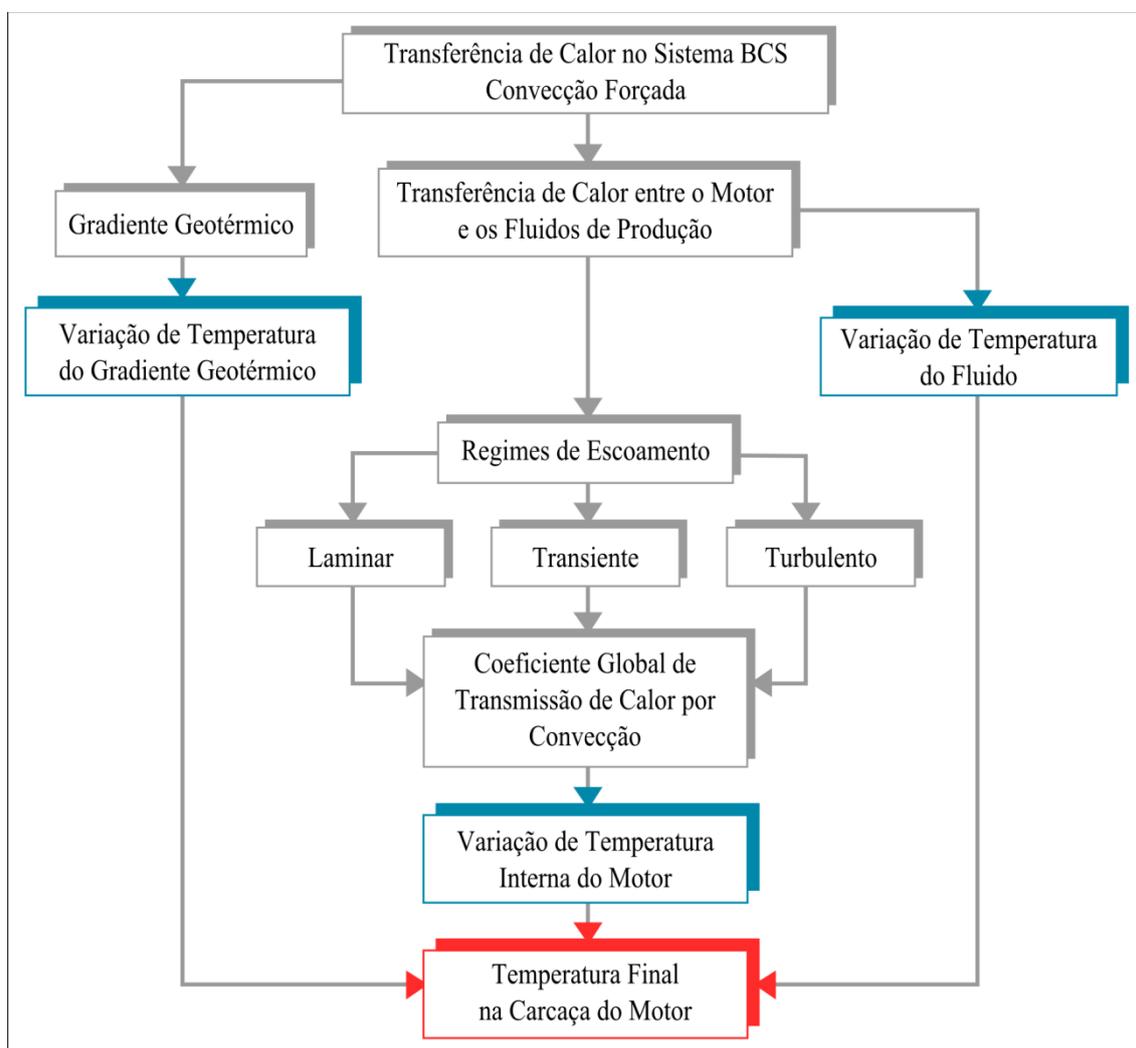


Figura 3. Esquema simplificado da modelagem realizada para o cálculo térmico.

De acordo com a Figura 3, o processo se iniciou dividindo a modelagem matemática em duas partes. A primeira foi referente à determinação da variação da temperatura devido a um gradiente geotérmico, característico da formação. Já a segunda

parte foi referente à obtenção das variações das temperaturas do motor e do fluido, a partir do processo de transferência de calor entre o motor e os fluidos de produção.

A variação da temperatura devido à presença de um gradiente geotérmico, bem como a variação da temperatura do fluido foram obtidas simultaneamente a partir das Equações 46 e 48 citadas anteriormente. Essas temperaturas puderam ser determinadas ao mesmo tempo, pois as variáveis presentes nas equações para obtê-las não dependem do regime de escoamento em que o fluido está submetido no sistema.

Quando se avalia a variação da temperatura do motor, analisa-se inicialmente em qual regime de fluxo o fluido está submetido. No trabalho, através do número de Reynolds, os limites de variação considerados para caracterizar cada regime de fluxo dentro de suas faixas estipuladas são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Limites de variação para caracterizar cada regime de fluxo.

Limites do número de Reynolds	Regime de escoamento
$N_{Re} \leq 2300$	Laminar
$2300 < N_{Re} < 4000$	Transiente
$N_{Re} \geq 4000$	Turbulento

Ao se estabelecer o tipo de regime de fluxo, obteve-se o coeficiente global de transmissão de calor por convecção, o qual é função também dos números adimensionais de Reynolds, de Prandt e de Nusselt. Para cada tipo de fluxo, esse coeficiente foi calculado de forma distinta. Se o regime se caracterizasse laminar, ele seria calculado de acordo com a Equação 43; caso fosse transiente, seria obtido conforme a Equação 44; se fosse turbulento, seria descrito conforme a Equação 45.

De posse do coeficiente global de transmissão de calor por convecção e das variáveis como área e calor gerado pelo motor, observa-se no esquema da modelagem a determinação da parcela referente à variação da temperatura interna do motor. Após obter a variação da temperatura do gradiente geotérmico, a do fluido e a interna do motor, somaram-se esses valores para definir a temperatura final na carcaça do motor, conforme a Equação 49.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

4. Resultados e Discussões

Tão importante quanto desenvolver a modelagem matemática do cálculo térmico é garantir que a mesma atenda aos requisitos para a qual foi projetada, apresentando valores coerentes e esperados para qualquer sistema submetido a diferentes cenários de produção.

Com o objetivo de se obter a validação da modelagem matemática desenvolvida, optou-se por comparar os resultados obtidos por ela com os valores de dados de campo de poços equipados com sensores de fundo e com um programa comercial utilizado na indústria do petróleo.

4.1 Comparação com Dados de Campo de Poços Equipados com Sensores de Fundo.

No processo de validação da modelagem matemática, foram realizadas simulações com quatro poços verticais reais, equipados com sensores de fundo. Dentre esses quatro, três deles foram comparados apenas com os valores dos dados de campo, e somente um foi comparado tanto com os dados obtidos a partir do sensor de fundo quanto com os valores obtidos através de um programa comercial utilizado na indústria do petróleo. Os parâmetros utilizados como dados de entrada para os três poços estão apresentados na Tabela 2.

O principal parâmetro analisado para validar o modelo matemático foi a temperatura na carcaça do motor. As simulações foram feitas com os poços em equilíbrio, isto é, já estabilizados, para o mesmo tempo de simulação.

Analisando a Tabela 2, os poços 1 e 2 podem ser classificados como poços de fluxo multifásico (líquido e gases) devido ao alto valor de RGO. Por sua vez, o poço 3 pode ser classificado praticamente como poço de fluxo monofásico, em virtude da baixa presença de gás. Uma das diferenças nas aplicações de ambos os modelos propostos são as variações das propriedades de fluxo do fluido, tais como a condutividade térmica do fluido, o calor específico, a massa específica e a viscosidade.

Tabela 2. Parâmetros de entrada (comparação com os dados de campo).

Parâmetro de entrada	Poço 1	Poço 2	Poço 3
Diâmetro nominal do revestimento (<i>in</i>)	6,276	6,184	6,366
Diâmetro nominal da coluna (<i>in</i>)	2,441	2,441	2,441
Profundidade média dos canhoneados (<i>m</i>)	2270	2868	2223
Profundidade da bomba (<i>m</i>)	2231,8	2602,7	2143,4
Ângulo de inclinação (<i>graus</i>)	90	90	90
Rugosidade da tubulação (<i>ft</i>)	0,000433	0,000433	0,000433
Diâmetro do <i>shroud</i> (<i>in</i>)	5,5	5,5	5,5
Modelo do reservatório	Vogel	Vogel	Vogel
Pressão estática do reservatório (<i>kgf/cm²</i>)	180	180	200
Vazão de teste (<i>m³/d</i>)	37,9	79	111,8
Pressão de teste (<i>kgf/cm²</i>)	11	23,4	25,5
Nível dinâmico (<i>m</i>)	504,7	844,747	300
Pressão na cabeça (<i>kgf/cm²</i>)	12	9	10
Pressão no revestimento (<i>kgf/cm²</i>)	5	5	7
Temperatura na superfície (<i>°C</i>)	38	38	32
Gradiente geotérmico (<i>°C/m</i>)	0,0211	0,0211	0,0211
Grau API	40	40	39,5
BSW (%)	89,8	90,4	80
RGO (<i>m³/m³</i>)	200	200	40
Modelo da bomba	P4	P6	P8 - SSD
Número de estágios	269	360	260
Frequência de operação da bomba (<i>Hz</i>)	60	60	55
Modelo do motor	Centrilift 450	Centrilift 450	Centrilift 450
Potência do motor (<i>HP</i>)	72	135	119
Tensão nominal do motor (<i>V</i>)	1185	1215	1300
Corrente nominal do motor (<i>A</i>)	39	71	58
Temperatura máxima do motor (<i>°C</i>)	121	121	163
Diâmetro do motor (<i>in</i>)	4,5	4,5	4,5
Comprimento do motor (<i>m</i>)	3,7	6,4	7,12
Peso do motor (<i>kg</i>)	281	497	559
Volume de óleo mineral (<i>l</i>)	2,28	2,66	2,28
Modelo do cabo de potência	AWG n° 2 coated	AWG n° 2 coated	AWG n° 2 coated

Com os dados da Tabela 2 foi possível obter o valor da variável de interesse para a comparação, sendo feito também o cálculo do erro relativo entre os resultados. O erro relativo pode ser expresso conforme a Equação 50.

$$\varepsilon = 100 \cdot \left(\frac{Valor_{Sensor} - Valor_{Desenvolvido}}{Valor_{Sensor}} \right) \quad (50)$$

Os resultados alcançados pela modelagem matemática desenvolvida e os erros relativos podem ser visualizados pela Tabela 3.

Tabela 3. Comparativo entre os resultados obtidos pela modelagem matemática desenvolvida e o sensor de fundo.

Poço	Temperatura do Motor (°C)		Erro relativo (%)
	Modelagem desenvolvida	Sensor de fundo	
Poço 1	111,27	102,03	9,06
Poço 2	103,85	101,58	2,23
Poço 3	92,05	87,66	5,01

Através da análise da Tabela 3, percebeu-se que os resultados conduzidos pela modelagem matemática desenvolvida apresentaram-se bastante coerentes quando comparados com os valores referentes ao sensor de fundo, com erros inferiores a 10 % para a variável observada. Entretanto, por se tratar de um dispositivo eletrônico localizado no interior do poço, o sensor de fundo pode apresentar imprecisão nas variáveis medidas. Dessa forma, criou-se uma tabela com a análise do desvio padrão da média das temperaturas referentes aos sensores de fundo dos poços avaliados, e notou-se que o poço 2 foi o que apresentou maior desvio em relação a temperatura média.

Tabela 4. Desvio padrão das temperaturas do motor registradas por sensores de mundo.

Poço	Desvio padrão da temperatura
Poço 1	1,84
Poço 2	3,00
Poço 3	0,50

Analisando a Tabela 4, notou-se que os desvios padrões apresentaram valores baixos, inferindo-se que no período de registro das medições houve uma pequena

dispersão dos dados em relação ao valor médio. Por isso, utilizou-se a temperatura média para as análises comparativas.

4.2 Comparação com Dados do Programa Comercial e com Dados de Campo de um Poço Equipado com Sensores de Fundo

Nesta subseção, foi analisada a comparação entre os resultados referentes a um simulador comercial, a um poço equipado com sensor de fundo e à modelagem matemática desenvolvida, a fim de se mostrar o desempenho do trabalho proposto. Os dados de entrada do poço 4 que foi usado nessa comparação são ilustrados por meio da Tabela 5.

A Equação 50 foi usada para o cálculo do erro relativo dos valores obtidos pela modelagem matemática desenvolvida em relação aos valores referentes ao sensor de fundo. Uma equação semelhante foi usada para também determinar o erro relativo dos valores obtidos por um simulador comercial, substituindo o parâmetro que corresponde ao valor desenvolvido ($Valor_{Desenvolvido}$) pela variável correspondente ao valor comercial ($Valor_{Comercial}$), obtendo-se os erros relativos para o simulador comercial, descrito conforme a Equação 51.

$$\varepsilon = 100 \cdot \left| \left(\frac{Valor_{Sensor} - Valor_{Comercial}}{Valor_{Sensor}} \right) \right| \quad (51)$$

Comparando os resultados apresentados na Tabela 6 com aqueles da Tabela 3, notou-se que os erros relacionados ao poço 4 foram superiores tanto para a modelagem desenvolvida quanto para o simulador comercial. Porém, o resultado obtido através do estudo em questão se mostrou satisfatório e com erro relativo menor do que o apresentado pelo simulador comercial.

Tabela 5. Parâmetros de entrada (comparação de dados de campo com os do simulador comercial).

Parâmetro de entrada	Poço 4
Diâmetro nominal do revestimento (<i>in</i>)	6,366
Diâmetro nominal da coluna (<i>in</i>)	2,441
Profundidade média dos canhoneados (<i>m</i>)	2244
Profundidade da bomba (<i>m</i>)	2201
Ângulo de inclinação (<i>graus</i>)	90
Rugosidade da tubulação (<i>ft</i>)	0,000433
Diâmetro do <i>shroud</i> (<i>in</i>)	5,5
Modelo do reservatório	Vogel
Pressão estática do reservatório (<i>kgf/cm²</i>)	180
Vazão de teste (<i>m³/d</i>)	100
Pressão de teste (<i>kgf/cm²</i>)	40
Nível dinâmico (<i>m</i>)	200
Pressão na cabeça (<i>kgf/cm²</i>)	110
Pressão no revestimento (<i>kgf/cm²</i>)	10
Temperatura na superfície (<i>°C</i>)	52
Gradiente geotérmico (<i>°C/m</i>)	0,0211
Grau API	38
BSW (%)	90
RGO (<i>m³/m³</i>)	20
Modelo da bomba	P6
Número de estágios	302
Frequência de operação da bomba (<i>Hz</i>)	60
Modelo do motor	Centrilift 450
Potência do motor (<i>HP</i>)	93
Tensão nominal do motor (<i>V</i>)	1165
Corrente nominal do motor (<i>A</i>)	53
Temperatura máxima do motor (<i>°C</i>)	176
Diâmetro do motor (<i>in</i>)	4,5
Comprimento do motor (<i>m</i>)	5,2
Peso do motor (<i>kg</i>)	404
Volume de óleo mineral (<i>l</i>)	2,268
Modelo do cabo de potência	AWG n° 2 coated

Tabela 6. Comparativo entre os resultados obtidos pela modelagem desenvolvida, pelo simulador comercial e pelo sensor de fundo.

Poço 4	Temperatura do Motor (°C)	Erro relativo em relação ao sensor de fundo (%)
Modelagem desenvolvida	118,34	18,07
Simulador comercial	123,00	22,72
Sensor de fundo	100,23	-

Capítulo 5

Conclusão

5. Conclusão

Neste trabalho foi apresentada uma importante modelagem matemática da transferência de calor no método de elevação artificial por BCS. Com ela é possível realizar uma avaliação do comportamento da temperatura durante a produção dos poços de petróleo equipados com esse método de elevação artificial. O estudo foi voltado para uma abordagem da influência da temperatura devido ao gradiente geotérmico e, também, para uma abordagem da transferência de calor entre o motor e os fluidos de produção que ocorre por convecção forçada.

A metodologia de cálculo utilizada na modelagem matemática foi implementada no simulador BCS. Ela apresentou um conjunto de equações para determinar a temperatura final do sistema, na carcaça do motor, em função do somatório das variações da temperatura devido ao gradiente geotérmico, à variação da temperatura interna do motor e do fluido em escoamento.

A fim de se obter a validação da modelagem desenvolvida, foram comparados os resultados obtidos por ela com os dados de campo de poços equipados com sensores de fundo e com os resultados de um programa comercial utilizado na indústria do petróleo. Os resultados se mostraram coerentes e satisfatórios para ambos os casos, apresentando em sua maioria erros relativos inferiores a 10%. Quando foi feita a comparação com o simulador comercial, o trabalho desenvolvido apresentou desempenho superior.

Portanto, é importante analisar os resultados obtidos a partir do cálculo térmico, pois possibilita a verificação adequada das condições de operação dos equipamentos do sistema BCS. Isso ocorre especialmente em relação àqueles que estão diretamente relacionadas com o sistema elétrico, tais como o cabo e o motor, pois a variação da temperatura afeta diretamente o funcionamento desse conjunto. Além disso, com esses resultados, estudos podem ser desenvolvidos para a redução quantitativa dos efeitos prejudiciais causados pelas altas temperaturas durante a operação do poço, com o intuito de aumentar a eficiência do sistema como um todo.

Como sugestão para trabalhos futuros pretende-se realizar simulações com mais poços reais equipados com sensores de fundo e a inclusão do modelo de Stehfest.

5.1 Publicações e Submissão

GALVÃO, H. L. C.; OLIVA, G. B. F. F.; NEVES, D. G.; COSTA, R. O.; MAITELLI, A. L.; MAITELLI, C. W. S. P. Thermal Calculation in ESP systems. In: RIO PIPELINE CONFERENCE & EXPOSITION 2013, Rio de Janeiro. **Anais eletrônicos**. Rio de Janeiro, 2013, CD-ROM.

Referências Bibliográficas

Referências Bibliográficas

BATISTA, E. S. *Desenvolvimento de uma Ferramenta Computacional para Aplicação no Método de Elevação por Bombeio Centrífugo Submerso*. 2009. 65f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2009.

BEAL, C. The viscosity of air, water, natural gas, crude oil and its associated gases at oil field temperatures and pressures. *Transactions of the AIME*, v.165, n.1, p.94-115, 1946.

BEGGS, H. D.; ROBINSON, J. R. Estimating the viscosity of crude oil systems. *Journal of Petroleum Technology*, v.27, n.9, p.1140-1141, 1975.

BRILL, J. P.; MUKHERJEE, H. *Multiphase flow in wells*. Richardson: SPE, 1999.

BROWN, K. E.; BEGGS, H. D. *The technology of artificial lift method*. Tulsa: PennWell Publishing Company, 1977.

COSTA, R. O. *Controle aplicado a poços com método de elevação bombeio centrífugo submerso*. 2012. 138f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia do Petróleo) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia do Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

CRAGOE, C. S. *Miscellaneous Publication N°97*, U.S. Bureau of Standards, Washington, DC (1929).

GANBILL, W. R. (1957), *You can Predict Heat Capacities, Chemical Engineering*.

GOULD, T. L. Vertical two-phase steam-water flow in geothermal wells. *Journal of Petroleum Technology*, v.26, n.8, p.833-842, 1974.

HOLMAN, J. P. *Heat transfer*. 10 ed. Boston: Mcgraw-Hill Trade, 2001.

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

KREITH, F. (1997). *Princípios de Transmissão de Calor*. São Paulo: Edgard Blucher.

KREITH, F.; MANGLIK, R. M.; BOHN, M. S. *Principles of heat transfer*. 7 ed. Stamford: Cengage Learning, 2011.

LEE, A. L.; GONZALEZ, M. H.; EAKIN, B. E. The viscosity of natural Gases. *JPT*, agosto de 1966.

ROSA, A. J.; CARVALHO, R. S.; XAVIER, J. A. D. *Engenharia de reservatórios de petróleo*. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

STANDING, M. B. *Volumetric and phase behavior of oil field hydrocarbon systems*. 9 ed. Richardson: SPE, 1981.