

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**JOÃO GABRIEL CLARINDO**

**SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO COM TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM  
VÁLVULAS DE COMPLETAÇÃO INTELIGENTE**

**CURITIBA-PR**

**2025**

**JOÃO GABRIEL CLARINDO**

**SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO COM TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM  
VÁLVULAS DE COMPLETAÇÃO INTELIGENTE**

**Heat transfer simulation of flow in smart completion valves**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador: Prof. Dr. Silvio Luiz de Mello Junqueira.  
Coorientador: Vinicius Gustavo Poletto, M. Sc.  
Coorientador: Fernando César De Lai, M. Sc.

**CURITIBA-PR**

**2025**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**JOÃO GABRIEL CLARINDO**

**SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO COM TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM  
VÁLVULAS DE COMPLETAÇÃO INTELIGENTE**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada  
como requisito parcial à obtenção do título de  
Engenheiro do curso de Engenharia Mecânica, do  
Departamento Acadêmico de Mecânica, da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Data de aprovação: 14/fevereiro/2025

---

Silvio Luiz de Mello Junqueira  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Luciano Fernando dos Santos Rossi  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Eduardo Matos Germer  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA**

**2025**

## RESUMO

Indústria e academia têm estudado novas maneiras de aprimorar as técnicas e estratégias de extração de petróleo. Entre as tecnologias desenvolvidas, está a Completação Inteligente, na qual Válvulas de Controle de Vazão (ICVs) são comumente utilizadas para controlar a produção de óleo em poços com múltiplas zonas de produção. Estudos mostraram que o perfil de temperatura de um poço pode ser útil na previsão da composição do fluido produzido, bem como detectar entradas de gás e água. O presente trabalho tem como objetivo modelar e simular a transferência de calor em válvulas ICVs instaladas em um poço com completação inteligente que produz a partir de três zonas de produção, avaliando a influência da vazão de cada zona no perfil de temperatura do poço. Campos de temperatura das válvulas são obtidos a partir de simulações de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) utilizando o modelo de turbulência k-epsilon *realizable*, considerando um escoamento turbulento e incompressível e com propriedades do fluido baseadas em modelos disponíveis na literatura. Assumindo escoamento monofásico, o perfil de temperatura do poço é calculado utilizando um modelo de regime estacionário com propriedades do fluido variáveis de acordo com a temperatura. Dois cenários de produção foram comparados. No primeiro cenário, a vazão na zona produtora mais profunda representa 1/8 da produção total, a vazão da zona intermediária é igual a 3/8 da produção total e a zona mais próxima da superfície tem vazão igual a 1/2 da vazão total. No segundo cenário, a vazão de cada zona representa 1/3 da produção total do poço. Em ambos os cenários a vazão total equivale a 40.000 barris por dia, sendo o gradiente geotérmico da formação igual a 4,782°C/100m. Os resultados mostraram que a distribuição de produção entre as zonas pode afetar significativamente o perfil de temperatura do poço, sendo, portanto, possível detectar inconformidades na produção comparando as temperaturas medidas com o perfil de temperatura previsto pelo modelo.

Palavras-chave: completação inteligente; CFD; ICV; transferência de calor.

## ABSTRACT

Industry and academia have been researching new ways to enhance techniques and strategies of oil extraction. Amongst technologies developed to optimize production is Intelligent Completion, in which Interval Control Valves (ICVs) are broadly used to control the oil production in multi-zone open-hole wells. Previous studies have shown that the temperature profile of the wellbore is useful in predicting flow composition as well as water and gas cuts. The flow distribution can then be regulated based on the monitored temperature behavior to achieve the required flow conditions. The present work aims to model and simulate heat transfer in ICVs assembled in an intelligent completion that produces from three different zones, presenting a steady-state analysis of the flow in terms of velocity and temperature profiles. Results for the temperature, velocity magnitude and pressure profiles are plotted based on Computational Fluid Dynamics simulations with the k-epsilon realizable model considering a fully turbulent and incompressible fluid with rheological and thermophysical properties sourced from existing literature models. The modeling assumes the flow as one-phase. The wellbore temperature profile is calculated using a steady-state model with temperature-dependent thermophysical fluid properties. Two production scenarios were compared. For the first scenario, the flow rate at the deepest zone represents  $1/8$  of the total production, the flow rate at the intermediate zone equals  $3/8$  of the total production and, at the zone closest to the surface, the flow rate is equal to  $1/2$  of the total flow rate. For the second scenario, the flow rate at each zone represents  $1/3$  of the total production of the well. In both scenarios the total flow rate is 40,000 barrels per day and the geothermal gradient is  $4.782^{\circ}\text{C}/100\text{m}$  rate zone. Results showed that the distribution of the production between zones influences greatly the temperature profile of the well. Comparing measured temperature with the model predicted temperature might help detecting nonconformities on the production.

Keywords: intelligent completion; CFD; ICV; heat transfer.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Produção de diversas zonas a partir de um mesmo poço: (a) completção convencional; (b) completção inteligente. ....	14
Figura 2: Formação de cone de água em poço horizontal .....	14
Figura 3: Ciclo de medição das condições do poço e resposta do sistema na superfície .....	15
Figura 4: Representação esquemática do escoamento em válvulas de camisa deslizante (SSV) num poço fechado com duas zonas produtoras .....	16
Figura 5: Registro do primeiro ICV instalado, em 1997 .....	18
Figura 6: Poço C-39 planejado antes (linha tracejada) e depois (Poço C-39 revisado) da recompletção do poço C-29 .....	19
Figura 7: Perfis de produção esperados antes e depois da recompletção.....	19
Figura 8: Número de poços completados em 2 e 3 zonas anualmente .....	20
Figura 9: Perfis de temperatura ao longo do poço para escoamentos monofásico (óleo), bifásico (óleo e gás) e trifásico (óleo, gás e água). ....	22
Figura 10: Experimento utilizado para estudar o perfil de temperatura em poços perfurados horizontais.....	23
Figura 11: Padrões de perfuração analisados por Mohammed, Sultan e Khazal (2021).....	24
Figura 12: Gradiente de temperatura ao longo do poço em função do fluxo de calor nas paredes para duas velocidades de entrada do fluido .....	25
Figura 13: Temperatura em função do comprimento do poço para duas velocidades de entrada do fluido.....	25
Figura 14: Diagrama do poço simulado .....	28
Figura 15: Diagrama das resistências térmicas do poço.....	31
Figura 16: Domínio da simulação CFD: (a) Representação da válvula; (b) Domínio fluido da Válvula; (c) Vista isométrica do domínio da válvula.....	32
Figura 17: Condições de contorno do domínio fluido da ICV .....	33
Figura 18: Escoamento na região de transição .....	36
Figura 19: Medição de velocidade típica em um escoamento turbulento .....	36
Figura 20: Temperaturas da parede e do escoamento e fluxo de calor para o escoamento em duto circular com temperatura constante na parede .....	40
Figura 21: Temperaturas da parede e do escoamento e fluxo de calor para o escoamento em duto circular com fluxo de calor constante na parede .....	40
Figura 22: Número de Nusselt obtidos na simulação de escoamento em duto circular com temperatura constante na parede.....	41
Figura 23: Número de Nusselt obtidos na simulação de escoamento em duto circular com fluxo de calor uniforme e constante na parede.....	42
Figura 24: Temperaturas da parede e do escoamento e fluxo de calor para o escoamento em duto anular com temperatura constante na parede. ....	43
Figura 25: Número de Nusselt obtidos na simulação de escoamento em duto anular com temperatura constante na parede.....	43
Figura 26: Aparato experimental.....	44
Figura 27: Vista da saída do duto principal do domínio fluido .....	44
Figura 28: Vista da entrada do duto secundário do domínio fluido .....	45
Figura 29: Disposição dos termostatos no aparato experimental: (a) vista lateral; (b) seção transversal.....	46

Figura 30: Posição dos termostatos no domínio fluido gerado.....	46
Figura 31: Campo de temperatura obtido através da simulação .....	47
Figura 32: Comparação entre as temperaturas no comprimento obtidas pela simulação e as observadas experimentalmente em $x=20d$ .....	47
Figura 33: Condições de operação em cada cenário .....	49
Figura 34: Perfil de temperatura para o primeiro cenário com apenas a ICV 1 totalmente aberta .....	51
Figura 35: Campo de temperatura na ICV 2 para o primeiro cenário .....	52
Figura 36: Perfil de temperatura para o primeiro cenário com a ICV 1 e ICV 2 totalmente abertas .....	53
Figura 37: Campo de temperatura na ICV 3 para o primeiro cenário .....	54
Figura 3839: Perfil de temperatura para o primeiro cenário com todas as válvulas 2 totalmente abertas .....	55
Figura 40: Perfil de temperatura para o segundo cenário com apenas a ICV 1 totalmente aberta .....	56
Figura 41: Campo de temperatura na ICV 2 para o segundo cenário .....	57
Figura 42: Perfil de temperatura para o segundo cenário com a ICV 1 e ICV 2 totalmente abertas .....	58
Figura 43: Campo de temperatura na ICV 3 para o segundo cenário .....	59
Figura 44: Perfil de temperatura para o segundo cenário com todas as válvulas 2 totalmente abertas .....	60
Figura 45: Perfis de temperatura para os dois cenários de produção .....	61

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1: Modelos utilizados nos cálculos das propriedades termofísicas do fluido produzido, da salmoura, do cimento e dos material da coluna de produção e do revestimento .....</b>	<b>29</b>
<b>Tabela 2: Parâmetros de produção e configuração do poço .....</b>	<b>48</b>
<b>Tabela 3: Vazão mássica de óleo produzido em cada zona produtora no primeiro cenário .....</b>	<b>49</b>
<b>Tabela 4: Vazão mássica de óleo produzido em cada zona produtora no segundo cenário.....</b>	<b>49</b>
<b>Tabela 5: Vazões mássicas em cada região da ICV .....</b>	<b>50</b>

## LISTA DE SÍMBOLOS

NaCl	Cloreto de Sódio
$T_f$	Temperatura do fluido produzido
$T_{ei}$	Temperatura da formação
$A_d$	Parâmetro de relaxação
$l_z$	Tamanho da célula
$g_G$	Gradiente geotérmico
$\theta$	Ângulo de inclinação do poço
$\varphi$	Efeitos da energia cinética e do coeficiente Joule-Thomson
$c_{pl}$	Calor específico do fluido produzido
$w$	Vazão mássica
$k_e$	Condutividade térmica da formação
$r_{ti}$	Raio interno da coluna de produção
$U_{ti}$	Coeficiente de transferência de calor global
$T_D$	Temperatura adimensional
$t_D$	Tempo adimensional
$\alpha_e$	Difusividade térmica da formação
$t$	Tempo de produção
$r_{wb}$	Raio do poço
$R_{total}$	Resistência térmica total equivalente
$A_{ti}$	Área da parede interna da coluna da produção
$h_{ti}$	Coeficiente de transferência de calor do fluido produzido
$r_{to}$	Raio externo da coluna de produção
$k_{tbg}$	Condutividade térmica da coluna de produção
$h_{ca}$	Coeficiente de transferência de calor do fluido presente na região anular
$r_{ci}$	Raio interno do revestimento
$k_{csg}$	Condutividade térmica do revestimento
$k_{cem}$	Condutividade térmica do cimento
$u$	Velocidade
$\bar{V}$	Velocidade média
$\dot{m}$	Vazão mássica
$\rho$	Massa específica
$A$	Área da seção transversal
$T$	Temperatura
$p$	Pressão
$\mu_t$	Viscosidade turbulenta
$C_\mu$	Constante adimensional
$\varepsilon$	Taxa de dissipação de energia cinética turbulenta por unidade de massa
$k_{eff}$	Condutividade térmica efetiva
$(\tau_{ij})_{eff}$	Dissipação viscosa do escoamento
$X$	Posição adimensional
$x$	Posição ao longo do comprimento do duto
$D$	Diâmetro
$Re$	Número de Reynolds
$Pr$	Número de Prandtl
$q''$	Fluxo de calor

$h_x$	coeficiente de transferência de calor
$Nu_x$	Número de Nusselt
$r_1$	Raio interno do duto anular
$r_2$	Raio externo do duto anular

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1	Caracterização do problema.....	16
1.2	Objetivos .....	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>18</b>
2.1	Completação inteligente .....	18
2.2	Transferência de calor em poços de petróleo .....	20
2.3	Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD).....	23
<b>3</b>	<b>FORMULAÇÃO MATEMÁTICA</b> .....	<b>27</b>
3.1	Perfil de temperatura do poço.....	27
3.1.1	Hipóteses simplificadoras .....	27
3.1.2	Cálculo da temperatura do fluido produzido .....	29
3.2	Geometria da válvula .....	32
3.2.1	Condições de contorno.....	33
3.3	Modelo de turbulência .....	35
3.3.1	Decomposição de Reynolds.....	35
3.3.2	Modelo de turbulência <i>k-ε Realizable</i> .....	37
3.3.3	Equação de energia .....	38
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>39</b>
4.1	Resultados dos testes de verificação.....	39
4.1.1	Transferência de calor em duto circular e anular .....	39
4.1.2	Mistura em T-Junction.....	44
4.2	Parâmetros do problema .....	48
4.2.1	Condições do contorno do poço .....	48
4.2.2	Parâmetros do problema das simulações em CFD .....	50
4.3	Resultados do caso em estudo.....	50
4.3.1	Primeiro Cenário de produção.....	50
4.3.2	Segundo Cenário de produção.....	55
4.3.3	Comparação entre os dois cenários de produção simulados .....	60
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>62</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>63</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A completação de um poço de petróleo refere-se à etapa de preparação de um campo de petróleo na qual são realizadas as operações de equipagem do poço. Os equipamentos e estruturas são instalados de acordo com as características do poço e têm como finalidade garantir a estabilidade das paredes e viabilizar operações de medição e regulação da vazão durante a fase de produção (Thomas, 2004). A tecnologia de completação inteligente é um avanço relativamente recente no campo da exploração de petróleo e foi desenvolvida com o intuito de permitir o controle remoto da vazão em diferentes segmentos do poço individualmente por meio, por exemplo, de válvulas de controle de fluxo (ICV) instaladas no fundo de poço (Zarea e Zhu, 2011).

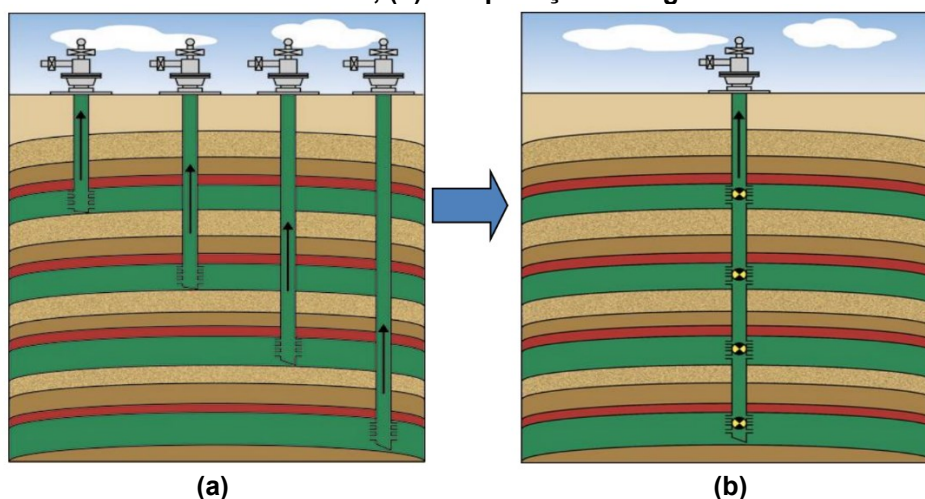
Além das válvulas, a completação inteligente é equipada com dispositivos de monitoramento permanente em diferentes pontos do poço, capazes de transmitir informações como temperatura e pressão em tempo real, permitindo que a equipe responsável otimize a distribuição da vazão em diferentes intervalos da completação de acordo com as condições observadas (Rodriguez e Figueroa, 2010).

De acordo com Rodriguez e Figueroa (2010), um poço dificilmente alcança apenas um reservatório e, tradicionalmente, utilizar apenas uma coluna de produção para realizar a extração de diferentes zonas de produção simultaneamente só era uma opção quando as zonas possuíam pressão e composição de fluido compatíveis. Caso a diferença de pressão entre os reservatórios fosse grande, a extração era realizada utilizando diferentes colunas de produção para cada reservatório, instaladas num mesmo poço, evitando *crossflow* entre as zonas de produção. Caso o poço não acomodasse o uso de múltiplas colunas, a produção era realizada sequencialmente, explorando cada reservatório individualmente. Nesse modelo sequencial, uma vez que a produção não é mais economicamente viável num reservatório, a zona é tamponada e abandonada de modo a permitir a completação e exploração da próxima zona. Na maioria dos casos, esse processo deixava para trás reservas consideráveis e apresentava um perfil de produção ruim (Yadav e Surya, 2012; Rodriguez e Figueroa, 2010).

A tecnologia utilizada na completação inteligente, entretanto, permite que a produção a partir de diferentes zonas seja realizada alternadamente através de uma

mesma coluna de produção, visto que as ICVs podem ser utilizadas para controlar a vazão do fluido produzido em cada zona individualmente, aumentando a produção total e diminuindo drasticamente o número de intervenções. Na Figura 1 é apresentado um diagrama que mostra como a completção inteligente pode ser projetada para a extração de múltiplas zonas através de um mesmo poço.

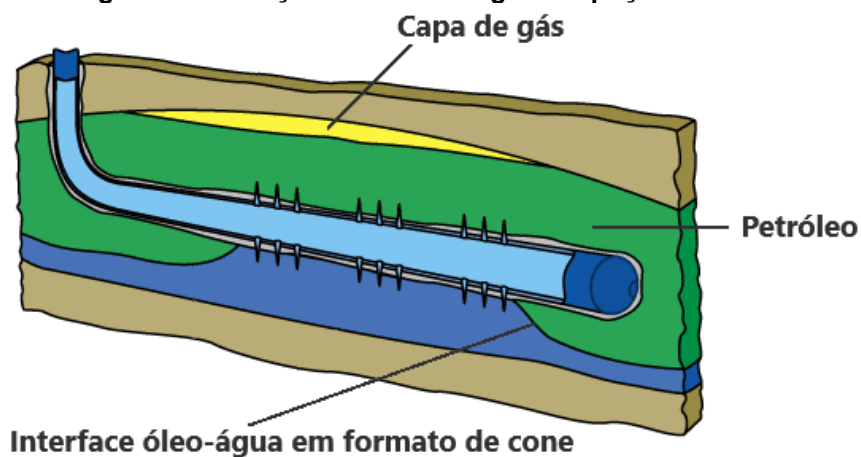
**Figura 1: Produção de diversas zonas a partir de um mesmo poço: (a) completção convencional; (b) completção inteligente.**



Fonte: Mathias (2013)

Outro problema que pode ser solucionado pela completção inteligente é a formação de cones de água. Trata-se da mudança no formato da interface óleo-água nas proximidades do poço causada, em parte, pelo gradiente de pressão no reservatório. O diagrama da Figura 2 ilustra essa mudança em poços horizontais. O formato de cone que a interface óleo-água assume pode resultar em uma produção excessiva de água (Okwananke e Isehunwa, 2009).

**Figura 2: Formação de cone de água em poço horizontal**

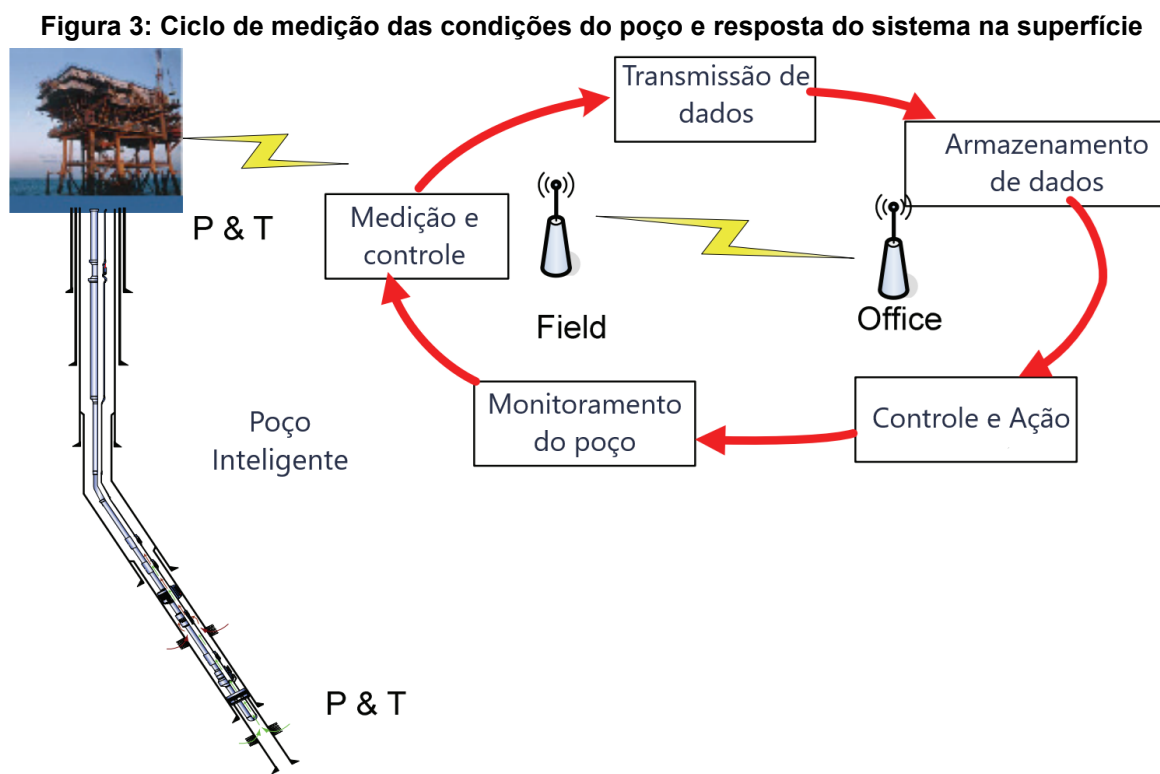


Interface óleo-água em formato de cone

Fonte: Adaptado de SCHLUMBERGER (2021)

Segundo Okwananke e Isehunwa (2009), apesar de fatores como viscosidade do fluido e permeabilidade vertical e horizontal do reservatório influenciarem na formação de cones de água, é possível encontrar correlações para estimar a vazão crítica de produção para evitar esse fenômeno. De acordo com Rodriguez e Figueroa (2010), a utilização de completação inteligente permite controlar a vazão em diferentes pontos do poço, evitando, assim, a formação de cones de água.

No sistema de completação inteligente, diversos equipamentos são utilizados para garantir que seja possível modificar e monitorar a performance do poço por meio do controle remoto sobre o escoamento e da aquisição de dados do fundo do poço em tempo real. Na Figura 3, observa-se o ciclo que envolve receber informações do fundo do poço, agir conforme necessário e avaliar o efeito das decisões tomadas (Rodriguez e Figueroa, 2010).



Fonte: Adaptado de Rodriguez e Figueroa (2010)

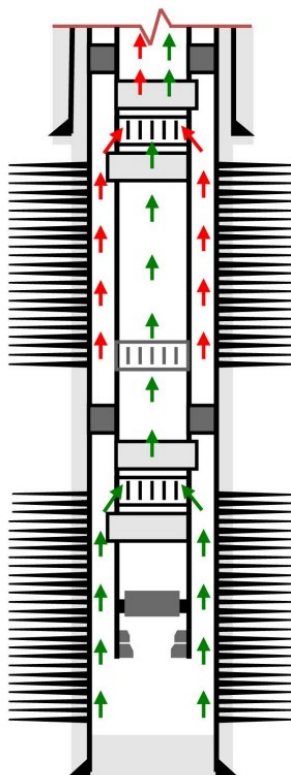
As ICVs (Interval Control Valves) são componentes da completação inteligente destinados a controlar a vazão de fluidos, possibilitando diversas posições de abertura (“choke positions”) e permitindo um controle variável da vazão. Os métodos de acionamento desse tipo de válvula podem ser divididos em hidráulico, elétrico e eletro-hidráulico (Fernández; Junior; Pinho, 2018). Schnitzler et al. (2015) apontam diversos benefícios do uso de ICVs observados em completações inteligentes com múltiplas

zonas em poços da bacia de Santos. O sistema de atuação hidráulica direta usado para acionar a ICV permitiu à equipe controlar a produção de gás e de água, testar a válvula de segurança, injeção e produção de duas zonas simultaneamente, entre outros benefícios.

### 1.1 Caracterização do problema

O diagrama da Figura 4 representa a produção a partir de duas zonas isoladas em uma completação inteligente. Rochas menos permeáveis promovem o isolamento entre as zonas. O fluido produzido na zona inferior, representado pelas flechas verdes, escoam da região anular do poço para a coluna de produção, onde eventualmente se mistura ao fluido produzido na zona superior, representado pelas flechas vermelhas.

**Figura 4: Representação esquemática do escoamento em válvulas de camisa deslizante (SSV) num poço fechado com duas zonas produtoras**



Fonte: Schnitzler et al. (2019)

O óleo presente num reservatório encontra-se em equilíbrio térmico com a formação rochosa. Quando extraído, o fluido troca calor com a formação ao longo do

poço e sua temperatura diminui conforme alcança a superfície. Em poços que produzem a partir de dois ou mais reservatórios simultaneamente fluidos em diferentes temperaturas se misturam na coluna de produção.

Apenas a vazão total da produção de um poço costuma ser conhecida, sendo que, normalmente, não se tem o valor da vazão individual em cada zona produtora. Assim, problemas como incrustação ou defeitos na válvula podem diminuir significativamente a produção de uma zona sem que se tenha conhecimento de que a zona está produzindo a uma vazão abaixo de sua capacidade.

## **1.2 Objetivos**

O objetivo principal deste trabalho é simular a transferência de calor em ICVs instaladas em um poço inteligente que extrai óleo de três zonas produtoras, considerando diferentes vazões e avaliando sua influência no perfil de temperatura da válvula utilizando ferramentas de Dinâmica dos Fluidos Computacional. Em conjunto com softwares de CFD, um modelo de perfil de temperatura de poços de petróleo será utilizado para modelar as condições de contorno de acordo com as condições da zona produtora na qual o equipamento está instalado. O modelo será utilizado para calcular a temperatura do fluido produzido ao longo de todo o comprimento do poço estudado, avaliando a influência das diferentes razões de vazão em cada zona de produção na temperatura do fluido produzido.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é apresentada uma contextualização geral sobre o uso de completação inteligente na exploração de petróleo, uma revisão da literatura sobre estudos que envolvem transferência de calor em poços de exploração e sobre o uso de Dinâmica dos Fluidos Computacional em estudos da área.

### 2.1 Completção inteligente

A primeira instalação bem-sucedida do sistema de completção inteligente ocorreu em 1997, em um campo petrolífero offshore da Noruega. Devido ao sucesso alcançado, diversas empresas passaram a estudar e desenvolver essa tecnologia ao longo da década seguinte. (Zarea e Zhu, 2011)

**Figura 5: Registro do primeiro ICV instalado, em 1997**

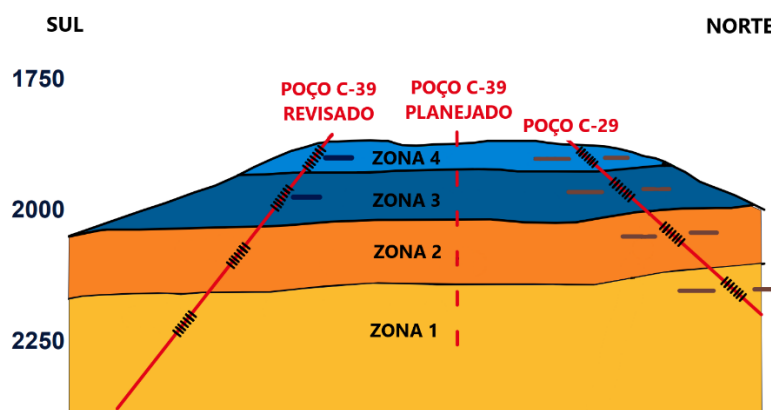


**Fonte: Joubran, 2018**

Lie e Wallace (2000) relatam que a recompletação realizada no campo petrolífero de Gullfaks, localizado no setor norueguês do Mar do Norte, utilizando o sistema inteligente, não só eliminou a necessidade da perfuração de um novo poço, mas também permitiu a produção simultânea a partir de 4 zonas produtoras, aumentando as projeções de produção estimadas. Foi a primeira vez que um poço foi recompletado utilizando o sistema de completção inteligente e o sucesso alcançado fez com que projetos similares utilizando a nova tecnologia passassem a ser desenvolvidos. Na

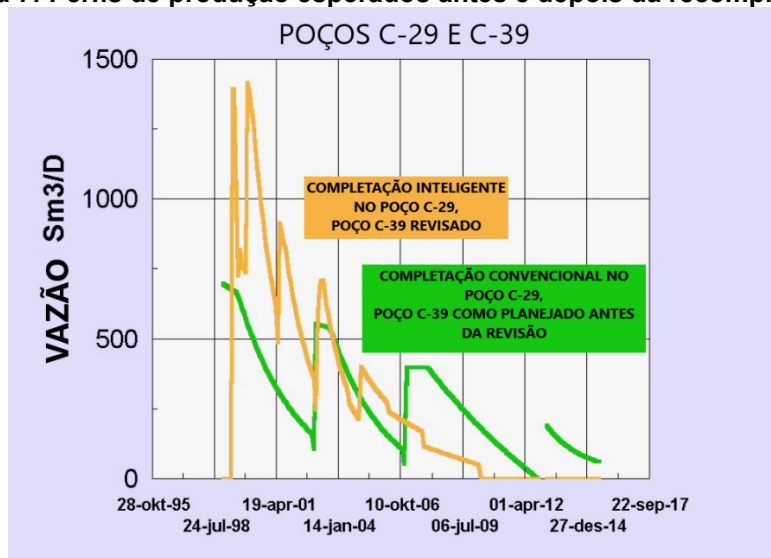
Figura 6 tem-se o poço C-39 planejado (linha tracejada) antes da recompletação do poço C-29. O projeto do poço C-39 foi revisado, alocando-o mais ao sul. A Figura 7 mostra os perfis de produção esperados antes e depois da recompletação, observa-se um aumento de aproximadamente 100% na produção diária dos poços inteligentes em relação aos convencionais.

**Figura 6: Poço C-39 planejado antes (linha tracejada) e depois (Poço C-39 revisado) da recompletação do poço C-29**



Fonte: Adaptado de Lie e Wallace, 2000

**Figura 7: Perfis de produção esperados antes e depois da recompletação.**



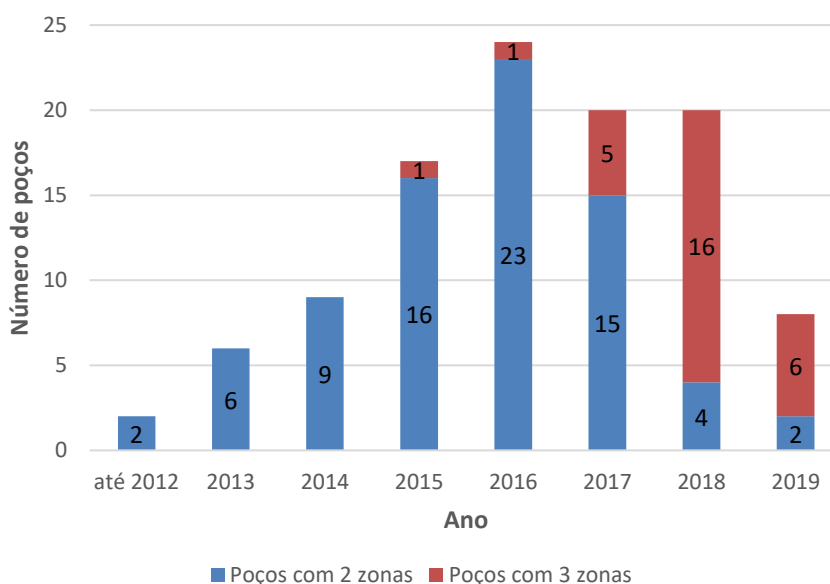
Fonte: Adaptado de Lie e Wallace, 2000

A companhia petrolífera Saudi Aramco, em 2004, teve sua primeira experiência com completamento inteligente. Os resultados promissores obtidos levaram a empresa a implementar a tecnologia em mais de 100 poços até 2009. Mubarak, Dawood e

Salamy (2009) documentaram os resultados obtidos por essas instalações e destacaram vantagens evidentes em relação aos métodos convencionais de completação.

Schnitzler et al. (2019). publicaram um artigo apresentando informações a respeito das 100 primeiras instalações de poços com completação inteligente no pré-sal da Bacia de Santos, realizadas entre 2012 e 2019. Um aspecto importante levantado pelo artigo foi o aumento significativo na parcela de poços completados em 3 zonas. A Figura 8 mostra que, até 2016, a maioria dos poços era completada em apenas 2 zonas, já em 2018 e 2019, poços completados em 3 zonas representaram a maior parte dos projetos realizados. Além disso, o tempo para completar um poço diminuiu em mais de 50% em relação aos primeiros poços completados. (Schnitzler 2019)

**Figura 8: Número de poços completados em 2 e 3 zonas anualmente**



**Fonte: Adaptado de Schnitzler (2019)**

## 2.2 Transferência de calor em poços de petróleo

Analisar os efeitos da transferência de calor na exploração de poços de petróleo tem sido o objetivo de muitos estudos desde a década de 1950. Kirkpatrick (1959) foi um dos primeiros a desenvolver um modelo de predição do perfil de temperatura de escoamentos em poços. Ele apresentou um quadro que foi amplamente utilizado para prever a temperatura de válvulas de *gas-lift* a partir de fatores como vazão do fluido e profundidade de injeção do gás (Sagar; Doty; Schmltd, 1991).

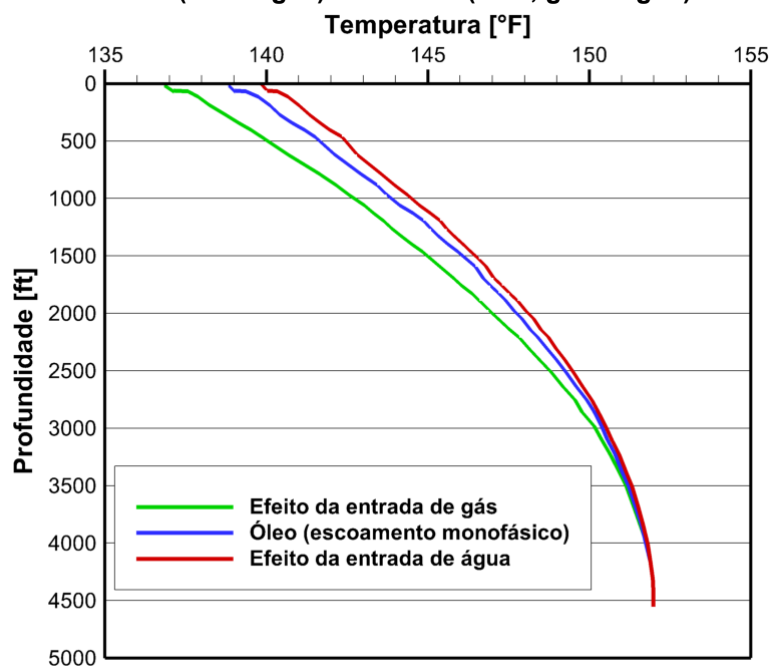
Ramey (1962), apresentou métodos para prever a transferência de calor em poços para escoamento de líquido monofásico incompressível e de gás ideal monofásico em função do tempo e da profundidade. Porém, a solução não considera fatores como calor gerado por atrito, expansão do gás, e efeitos do calor latente devido à mudança de fases.

Os modelos iniciais, em sua maioria, eram limitados a sistemas simples, não sendo apropriados para prever comportamentos em sistemas que apresentavam condições altamente variáveis. Durante a década de 1980, porém, a indústria de exploração de petróleo passou a exigir projetos mais confiáveis e com maior custo-benefício, procurando deixar de lado projetos excessivamente conservadores. Nesse contexto, a simulação passou a ser uma ferramenta necessária para obter informações precisas sobre as condições de operação (Mitchell, 1989).

Stone, Edmund e Kristoff (1989) introduziram modelos que simulam os efeitos térmicos e hidrodinâmicos tanto no reservatório quanto no poço de forma totalmente acoplada. O modelo proposto considerou um escoamento trifásico de três componentes (água, óleo e vapor). Livescu et al. (2009) incorporaram um modelo drift-flux, o que os permitiu simular o escorregamento entre as fases, incluindo fenômenos complexos como escoamento contracorrente.

Charles e Igbokoyi (2012) desenvolveram um modelo para prever a distribuição de temperatura em escoamentos monofásico, bifásico e trifásico, investigando o efeito que a entrada de gás e água tem sobre o perfil de temperatura ao longo do poço. O estudo mostra que a entrada de gás acentua a diminuição da temperatura ao longo do poço devido ao efeito Joule-Thomson. A entrada de água, entretanto, faz com que o fluido chegue na superfície em temperaturas mais altas. O modelo pode ser utilizado para prever a quantidade de água e gás sendo produzida. A Figura 9 mostra os perfis de temperatura ao longo do poço para os escoamentos analisados.

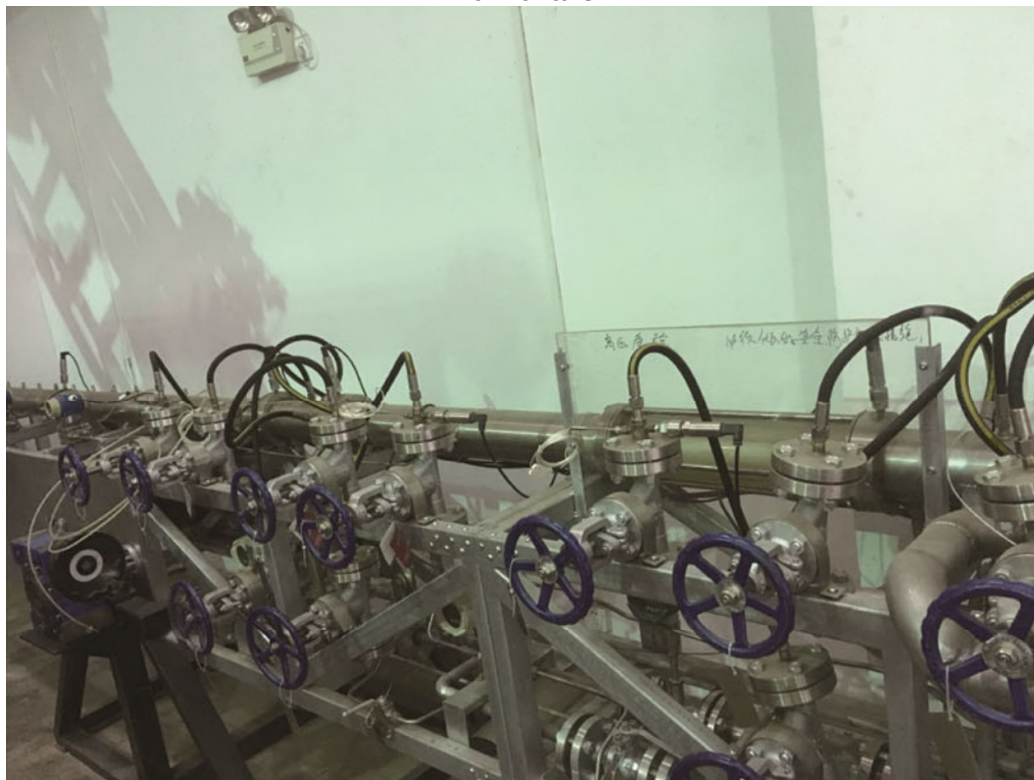
Figura 9: Perfis de temperatura ao longo do poço para escoamentos monofásico (óleo), bifásico (óleo e gás) e trifásico (óleo, gás e água).



Fonte: Adaptado de Charles e Igbokoyi (2012)

Zhang et al. (2020) utilizaram experimento (Figura 10) para estudar o perfil de temperatura em poços perfurados horizontais e compararam os resultados com valores teóricos. O modelo apresentou um erro de 4% e mostrou que o efeito Joule-Thomson é significativo em poços perfurados. Os resultados mostraram que a mudança de temperatura no poço é menor quando a distribuição de perfurações é mais uniforme. Os resultados a respeito da quantidade de água e gás no escoamento confirmam as conclusões obtidas por Charles e Igbokoyi (2012).

**Figura 10: Experimento utilizado para estudar o perfil de temperatura em poços perfurados horizontais**



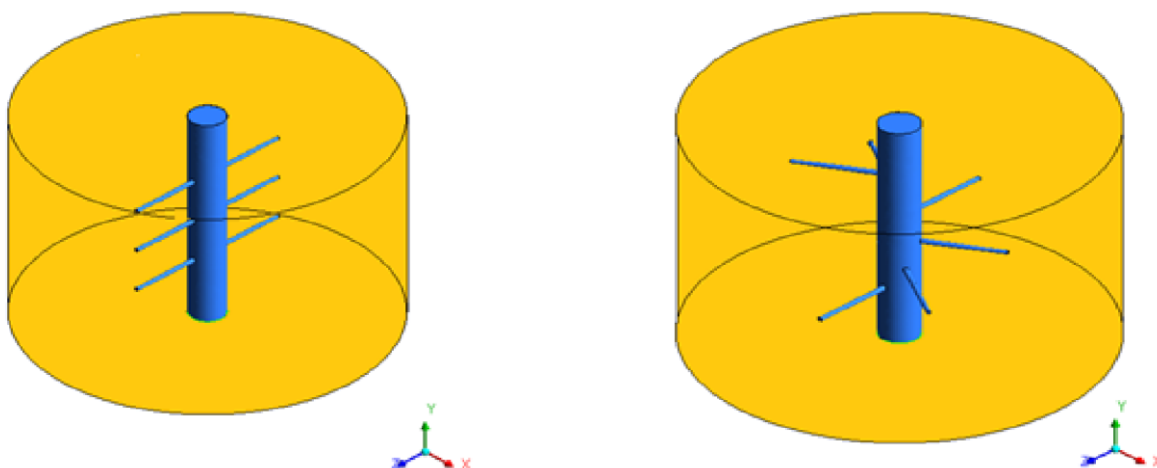
Zhang et al. (2020)

### **2.3 Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD)**

Bryne et al. (2010) abordaram a complexidade da diferença de permeabilidade existente nos arredores do poço e apresentaram o primeiro uso de modelos de CFD tridimensionais complexos para prever e mitigar a distribuição assimétrica de danos à formação em poços horizontais. Bryne et al. (2011) também apresentam, num artigo publicado em 2011, um estudo de caso em que os resultados de modelos de CFD foram comparados com a performance real do poço, além de comparar os resultados obtidos utilizando modelos analíticos tradicionais com os resultados obtidos com modelos de CFD de poço e reservatório totalmente acoplados. Resultados de testes em laboratório e dados do reservatório e do poço foram utilizados num modelo de CFD a fim de prever a produtividade avaliando diferentes cenários de completação, dano à formação, permeabilidade e pressão de poro. O poço simulado foi, então, perfurado, completado e testado, apresentando uma performance muito próxima à predita pelo modelo. Os autores ainda destacam que modelos analíticos convencionais não seriam capazes de fazer tal previsão.

Mohammed, Sultan e Khazal (2021) estudaram o efeito da permeabilidade e dos parâmetros de perfuração na queda de pressão e no índice de produtividade em poços perfurados verticais. Na Figura 11 observa-se os dois padrões de perfuração analisados. CFD foi utilizado para simular o escoamento monofásico usando o modelo  $k-\epsilon$  de turbulência em regime permanente. Os autores concluíram que: o aumento da permeabilidade do meio poroso causa uma diminuição da perda de carga e um aumento do índice de produtividade; o aumento da vazão causa um aumento da perda de carga e diminui o índice de produtividade; perfurações com diâmetros maiores apresentaram maior perda de carga, porém maior índice de produtividade e que o padrão de distribuição de perfurações helicoidal apresentou um desempenho melhor.

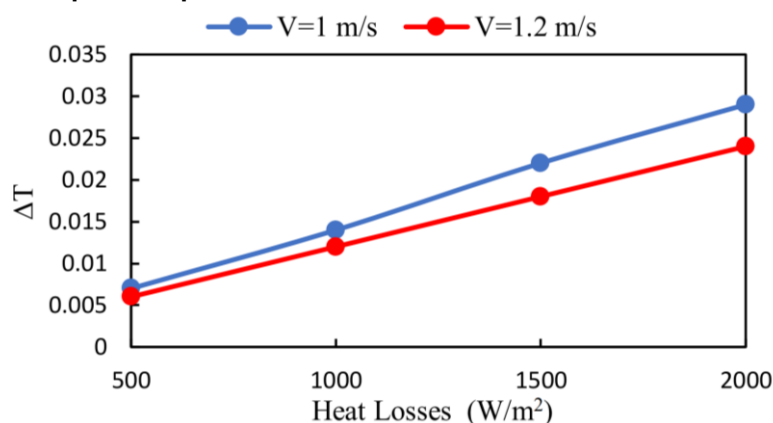
**Figura 11: Padrões de perfuração analisados por Mohammed, Sultan e Khazal (2021)**



**Fonte: Mohammed, Sultan e Khazal (2021)**

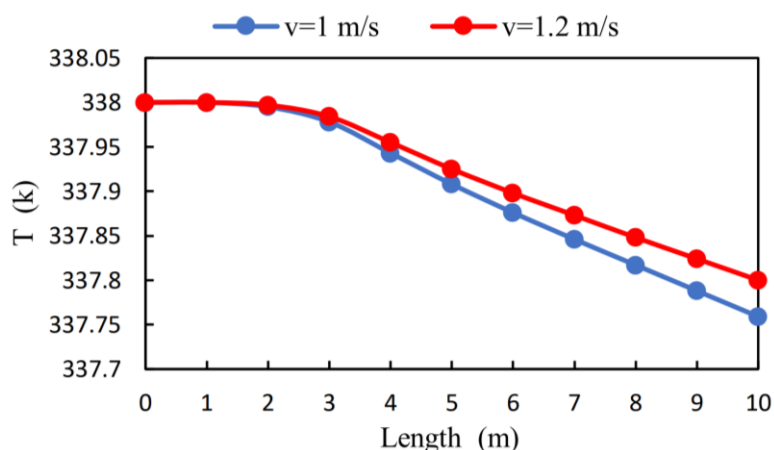
Mohammed, Sultan e Khazal (2022) também estudaram o efeito da velocidade de entrada do fluido e do fluxo de calor na parede de poços verticais abertos no gradiente de temperatura do fluido. CFD foi utilizado para simular o escoamento monofásico usando o modelo  $k-\epsilon$  de turbulência, adotando a temperatura de entrada do fluido igual a 338 K. No gráfico disposto na Figura 12 observa-se o gradiente de temperatura ao longo do poço em função do fluxo de calor nas paredes para duas velocidades de entrada do fluido. Nota-se que o gradiente de temperatura é maior quando o fluxo de calor nas paredes cresce e que quanto maior a velocidade do fluido, menor será sua variação de temperatura. Na Figura 13 tem-se a temperatura em função do comprimento do poço. Constata-se que a temperatura do fluido diminui ao longo do poço e que essa queda de temperatura é menor se o fluido estiver em velocidades maiores.

**Figura 12: Gradiente de temperatura ao longo do poço em função do fluxo de calor nas paredes para duas velocidades de entrada do fluido**



Fonte: Mohammed, Sultan e Khazal (2022)

**Figura 13: Temperatura em função do comprimento do poço para duas velocidades de entrada do fluido**



Fonte: Mohammed, Sultan e Khazal (2022)

Ramírez, Zambrano e Ratkovich (2023) empregaram um modelo de CFD simplificado a fim de estudar a variação dos perfis de temperatura e viscosidade na produção de óleo pesado ao implementar um dispositivo de aquecimento por indução no fundo de poço. Foi simulada a performance de um aquecedor por indução mantido a uma temperatura constante de 422,04 K instalado num poço de óleo pesado. Os dados de temperatura e viscosidade obtidos foram, então, comparados com dados experimentais fornecidos pela empresa BCPGroup. A simulação apresentou um erro percentual médio de 0,8% em relação à temperatura medida, o que foi considerado um resultado excelente. Para viscosidade, o erro percentual médio foi de 15,69%. De

acordo com os autores, isso se deve ao fato de que a regressão polinomial da viscosidade em função da temperatura foi obtida através da interpolação de dados experimentais e erros consideráveis são esperados ao realizar tal procedimento, uma vez que a viscosidade é extremamente sensível a variações de temperatura, portanto, correlações entre essas duas variáveis costumam resultar em fontes de desvio. O estudo confirmou os benefícios e a necessidade da implementação do sistema de aquecimento na exploração de óleo pesado (*“Heavy-crude-oil”*), visto que seu impacto na viscosidade é muito positivo, proporcionando um aumento na performance do poço.

Notam-se, a partir da leitura dos estudos discutidos nesse capítulo, a grande popularidade da completação inteligente e as vantagens da exploração de múltiplas zonas produtoras utilizando um mesmo poço. Tal prática é possível graças ao uso de válvulas ICV, as quais são amplamente utilizadas pela indústria de exploração de petróleo. Outro tema abordado neste capítulo foi o grande interesse da academia e da indústria em entender os aspectos da transferência de calor na exploração de petróleo, uma vez que o entendimento do comportamento térmico do escoamento pode trazer informações valiosas para a avaliação da performance do poço. Ademais, estudos que utilizam ferramentas de Dinâmica dos Fluidos Computacional apresentam resultados e previsões para situações complexas para as quais modelos analíticos tradicionais se mostrariam limitados.

### 3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Um modelo de perfil de temperaturas para produção de petróleo é utilizado considerando um poço vertical hipotético que produz a partir de três reservatórios. A vazão de cada zona é controlada por meio de ICVs. O modelo de Sui et al. (2018) é utilizado, inicialmente, considerando o fluido produzido apenas pela zona mais profunda (Zona 1), assumindo que as válvulas 2 e 3 estão completamente fechadas. Assim, obtém-se um perfil de temperatura preliminar que é utilizado para avaliar a temperatura na qual o do fluido produzido na Zona 1 se encontra quando alcança a profundidade da zona intermediária (Zona 2). Os valores da temperatura do fluido e da formação na profundidade da ICV 2 são utilizados como dados de entrada na simulação CFD, a qual determina a temperatura da mistura dos fluidos produzidos nas Zonas 1 e 2 na saída da válvula ICV 2.

O perfil de temperatura do poço é, então, recalculado considerando como fechada apenas a válvula mais próxima do leito marinho (ICV 3) o procedimento utilizado na ICV 2 é repetido para obter a temperatura do escoamento na saída da ICV 3. Finalmente, o perfil de temperatura é recalculado considerando todas as ICVs abertas.

Neste capítulo serão apresentadas as equações do modelo de perfil de temperatura utilizado, assim como as equações do modelo de turbulência utilizadas na simulação numérica.

#### 3.1 Perfil de temperatura do poço

O modelo de perfil de temperatura para produção de petróleo desenvolvido por Sui et al. (2018) foi implementado.

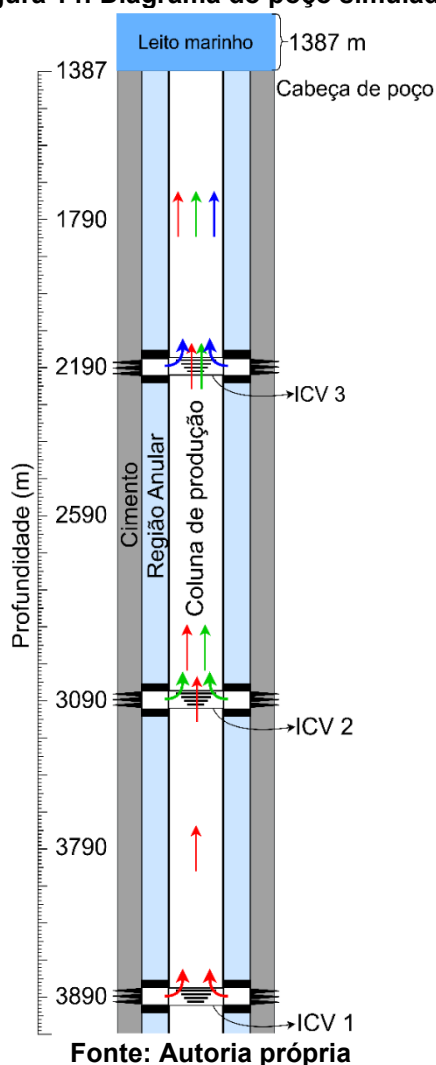
##### 3.1.1 Hipóteses simplificadoras

Para calcular a transferência de calor ao longo do poço, são consideradas algumas hipóteses a respeito da configuração do poço e das condições de produção:

- As condições de contorno do reservatório foram baseadas no estudo de caso de um poço de produção offshore apresentado por Ferreira et al. (2017). Os valores adotados estão dispostos na Tabela 2, no capítulo de Resultados.
- Transferência de calor acontece apenas no sentido radial.

- O poço simulado é formado por uma coluna de produção e um revestimento (casing). O revestimento é cimentado por toda a extensão do poço.
- A região anular entre a coluna de produção e o revestimento é preenchida com salmoura 3,5 wt% NaCl.
- Convecção natural ocorre na região anular.
- Os efeitos de radiação são desprezados.
- O poço apresenta de três zonas de produção. A vazão de cada zona é controlada por uma ICV. As profundidades de cada ICV, junto de outros parâmetros de produção, estão dispostas na Tabela 2 na seção 4.2.1.
- A Figura 14: é um diagrama representativo da geometria do poço e das condições de operação. A produção de petróleo de cada zona é representada por uma flecha de cor diferente

**Figura 14: Diagrama do poço simulado**



- Propriedades termofísicas e reológicas dos fluidos são calculadas em função da temperatura de acordo com os modelos apresentados por Sui et al. (2018). Os modelos utilizados para cada parâmetro estão listados na Tabela 1.

**Tabela 1: Modelos utilizados nos cálculos das propriedades termofísicas do fluido produzido, da salmoura, do cimento e dos material da coluna de produção e do revestimento**

<b>Propriedades do fluido na região anular</b>	<b>Modelos</b>
Condutividade térmica [ $W m^{-1} K^{-1}$ ]	Ozbek and Phillips, 1979
Calor específico [ $J kg^{-1} K^{-1}$ ]	Jamieson et al., 1969
Viscosidade dinâmica [cP]	Numbere et al., 1977
Massa específica [lb/gal]	Kutasov and Eppelbaum, 2015
<b>Propriedades do fluido produzido</b>	<b>Modelos</b>
Condutividade térmica [ $W m^{-1} K^{-1}$ ]	Mansure, 1996
Calor específico [ $J kg^{-1} K^{-1}$ ]	Wright, 2014
Viscosidade dinâmica [cP]	Beggs and Robinson, 1975
Massa específica [lbm/m <sup>3</sup> ]	Sattarin et al., 2007
<b>Propriedades do cimento, revestimento e coluna de produção</b>	<b>Modelos</b>
Condutividade térmica da coluna de produção e do revestimento [ $W m^{-1} K^{-1}$ ]	Furrer and Semiatin, 2010
Condutividade térmica do cimento [ $W m^{-1} K^{-1}$ ]	Santoyo et al., 2001

Fonte: Autoria própria

### 3.1.2 Cálculo da temperatura do fluido produzido

O poço é dividido na direção axial em múltiplas células  $i$  de comprimento  $l_z$ . Para cada célula, a temperatura do fluido é calculada utilizando a Equação (1)

$$T_f(i) = T_{ei}(i) + A_d(i) \left[ 1 - e^{-l_z/A_d(i)} \right] \left( g_G(i) \cos\theta(i) + \varphi(i) - \frac{g \cos\theta(i)}{c_{pl}(i)} \right) + e^{-l_z/A_d(i)} (T_f(i-1) - T_{ei}(i-1)) \quad (1)$$

sendo  $g_G$  o gradiente geotérmico,  $\theta$  é o ângulo de inclinação do poço,  $\varphi$  é um parâmetro que representa os efeitos da energia cinética e do coeficiente Joule-Thomson, os quais, de acordo com Sagar et al. (1991), podem ser considerados iguais a zero para vazões mássicas superiores a 2,27 kg/s. O cálculo é feito do fundo do poço ( $i = 1$ ) até o topo ( $i = n$ ), sendo que o cálculo de cada célula ( $i$ ) é baseado na temperatura do fluido na célula anterior ( $i-1$ ). O Primeiro passo do cálculo ( $i = 1$ ) ocorre no fundo do poço, onde assume-se que a temperatura do fluido é igual a temperatura da formação  $T_f(1) = T_{ei}(1) = T_{bh}$ . A temperatura da formação ( $T_{ei}$ ) é calculada de acordo com o gradiente geotérmico, como demonstrado na Equação (2):

$$T_{ei}(i) = T_{ei}(i-1) - g_G(i) \cos\theta(i) l_z \quad (2)$$

o parâmetro de relaxação  $A_d$  é calculado utilizando-se a Equação (3):

$$A_d(i) = \frac{c_{pl}(i) w(i)}{2\pi} \left[ \frac{k_e(i) + (r_{ti} U_{ti}(i) T_D(i))}{r_{ti} U_{ti}(i) k_e(i)} \right] \quad (3)$$

sendo  $w(i)$  a vazão mássica,  $k_e$  a condutividade térmica da formação,  $r_{ti}$  o diâmetro interno do da coluna de produção.

A temperatura adimensional  $T_D$  é obtida usando utilizando a aproximação algébrica apresentada por Izgec et al. (2010) descrita na Equação (4)

$$T_D = \ln[e^{-0.2 t_D} + (1.5 - 0.3719 e^{-t_D})\sqrt{t_D}] \quad (4)$$

sendo  $t_D$  o tempo adimensional, descrito pela Equação (5).

$$t_D = \frac{\alpha_e t}{r_{wb}^2} \quad (5)$$

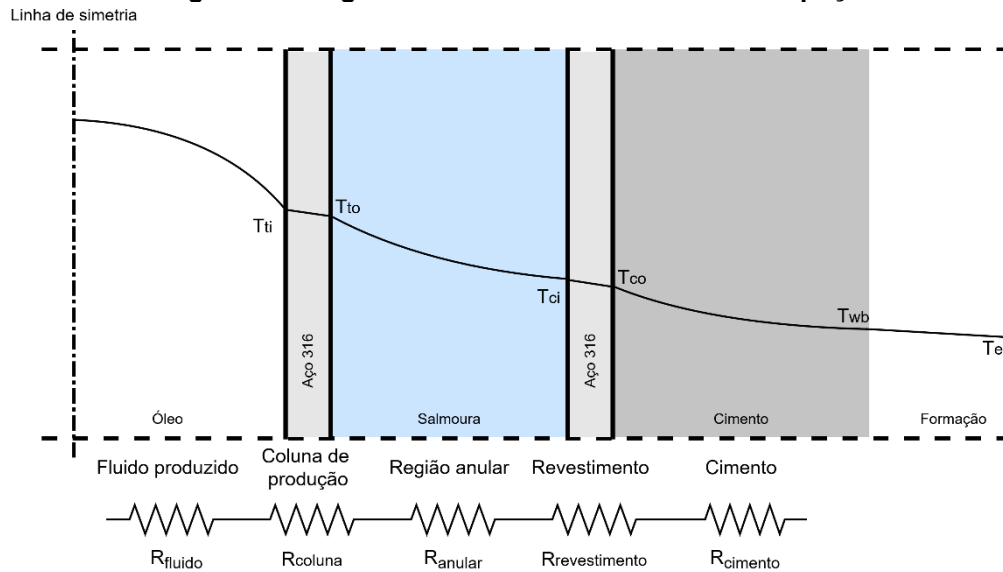
$r_{wb}$  é o raio do poço e  $\alpha_e$  é a difusividade térmica da formação.

O coeficiente de transferência de calor global é calculado a partir da Equação (6).

$$U_{ti} = \frac{1}{R_{total} A_{ti}} \quad (6)$$

$A_{ti}$  representa a área da parede interna da coluna de produção e  $R_{total}$  representa a resistência térmica total equivalente. Na Figura 15 Figura 15: Diagrama das resistências térmicas está representada a associação de resistências térmicas do poço. A Equação (7) descreve matematicamente a associação mostrada no diagrama. Cada termo do lado direito da equação representa a resistência térmica de cada material.

**Figura 15: Diagrama das resistências térmicas do poço**



Fonte: Autoria própria

$$R_{total} = \frac{1}{2 \pi r_{ti} l_z h_{ti}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{to}}{r_{ti}}\right)}{2 \pi l_z k_{tbg}} + \frac{1}{2 \pi r_{to} l_z h_{ca}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{co}}{r_{ci}}\right)}{2 \pi l_z k_{csg}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{wb}}{r_{co}}\right)}{2 \pi l_z k_{cem}} \quad (7)$$

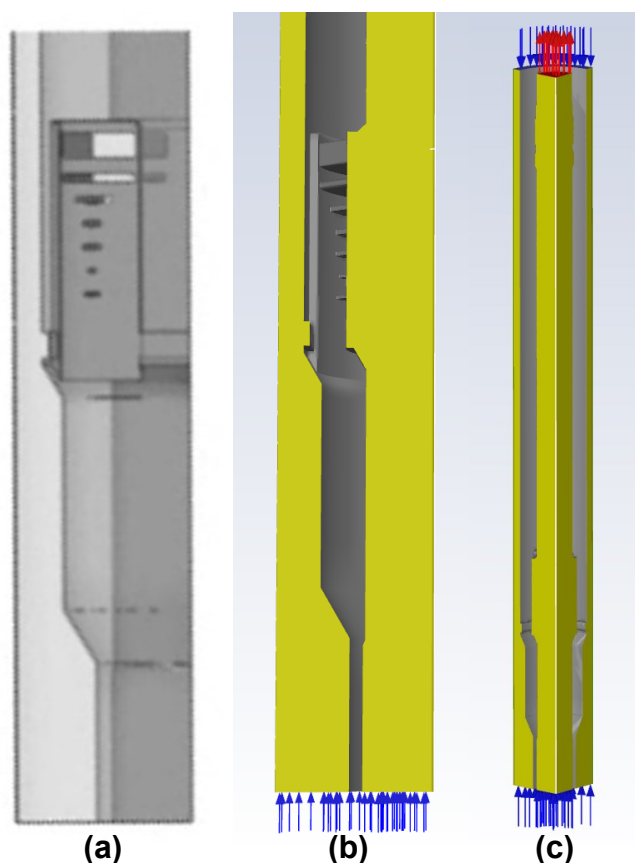
Considera-se que ocorre convecção forçada na região do fluido produzido e convecção natural na região anular. Transferência de calor por condução ocorre na região cimentada e nas paredes da coluna de produção e do revestimento. Na Equação (7),  $r_{to}$  e  $r_{co}$  são os raios externos da coluna de produção e do revestimento respectivamente,  $r_{ci}$  é o raio interno do revestimento. Os termos  $k_{tbg}$ ,  $k_{csg}$  e  $k_{cem}$  são as condutividades térmicas da coluna de produção, do revestimento e do cimento respectivamente. O termo  $h_{ti}$  representa o coeficiente de transferência de calor por convecção forçada do fluido produzido e  $h_{ca}$  representa o coeficiente de transferência de calor por convecção natural do fluido presente na região anular.

O cálculo da temperatura do fluido é iterativo. Uma vez que as propriedades e condições constantes são definidas, os modelos apresentados na Tabela 1 são implementados para calcular as propriedades variáveis em função da temperatura em cada célula. A temperatura do fluido é, então, calculada considerando os valores das propriedades obtidos. As propriedades variáveis são recalculadas e esse processo continua iterativamente até que a convergência seja atingida em todo o comprimento do poço.

### 3.2 Geometria da válvula

A ICV estudada trata-se de uma válvula de controle de escoamento multiposição comumente utilizada na indústria. A válvula é composta por uma região anular, por onde escoo o fluido produzido na zona onde a válvula está instalada, e pela região da coluna, por onde escoo o fluido produzido pelas zonas inferiores. Quando a válvula está aberta, o fluido escoo da região anular para a coluna. A região que conecta os dois domínios da válvula é chamada de *trim*. Na entrada da válvula, o diâmetro interno da coluna da válvula mede 0,0980 metros, enquanto os diâmetros interno e externo da região anular medem 0,1160 metros e 0,2159 metros, respectivamente. A partir do domínio sólido da válvula, é gerada a geometria do espaço ocupado pelo fluido na válvula por operação booleana, considerando a válvula totalmente aberta. Visto que a válvula apresenta simetria, é possível simular o escoamento modelando apenas 1/4 do domínio real do fluido e aplicar uma simetria angular de 90° como condição de contorno. Na Figura 16 está disposta uma representação da válvula (a) junto da geometria do domínio do fluido gerada considerando simetria angular de 90°.

**Figura 16: Domínio da simulação CFD: (a) Representação da válvula; (b) Domínio fluido da Válvula; (c) Vista isométrica do domínio da válvula**



Fonte: Autoria própria

### 3.2.1 Condições de contorno

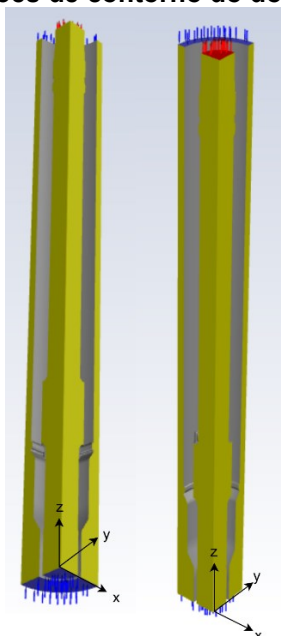
No total, foram realizadas quatro simulações, duas para o primeiro cenário de produção e duas para o segundo cenário. As válvulas ICV2 e ICV3 foram simuladas no software Ansys Fluent uma vez que são as válvulas onde ocorre a mistura de dois fluidos em diferentes temperaturas. As seguintes hipóteses foram consideradas na simulação:

- Propriedades do fluido variam em função da temperatura de acordo com os modelos apresentados na Tabela 1;
- Transferência de calor por radiação desprezível;
- Escoamento monofásico;
- Regime permanente;
- Fluido incompressível;
- Escoamento turbulento;
- Vazão constante e uniforme nas entradas das válvulas;
- Dissipação viscosa desprezível;
- Fluido newtoniano;

O fluido entra na válvula em velocidade e temperatura constantes.

Estão representados na Figura 17 as superfícies da geometria nas quais serão aplicadas as condições de contorno.

**Figura 17: Condições de contorno do domínio fluido da ICV**



**Fonte: Autoria própria**

Nas superfícies representadas em amarelo é aplicada condição de simetria. De acordo com Versteeg e Malalasekera (2007), condições de contorno de simetria possuem as seguintes características: nenhum escoamento ou fluxo escalar ocorre através da fronteira, velocidades normais ao limite são consideradas iguais a zero e os valores de qualquer outra propriedade  $\phi$  de fora do domínio (índice 1,  $f$ ) são igualadas ao nó mais próximo dentro do domínio (índice 2,  $f$ ), conforme a Equação (8).

$$\phi_{1,f} = \phi_{2,f} \quad (8)$$

As superfícies em azul representam as regiões de entrada da válvula, às quais são atribuídas condição de velocidade uniforme. Os valores das velocidades de entrada são definidos de acordo com a vazão do fluido produzido em cada zona. O fluido na região anular representa a produção da zona onde a ICV está instalada e o fluido na entrada da coluna representa a produção das zonas inferiores.

Uma vez que a massa específica do fluido varia com a temperatura, o valor da temperatura  $T$  é necessário para o cálculo da vazão volumétrica e, conseqüentemente, da velocidade média do escoamento na entrada. As velocidades podem ser descritas de acordo com as Equações (9), (10) e (11).

$$u(x, y, z = 0)_{an.inf.} = \overline{V_{an.inf.}} = \frac{\dot{m}_{an.inf.}}{\rho(T)A_{an.inf.}}, \text{ para } R_{aii} < R < R_{aie} \quad (9)$$

$$u(x, y, z = 0)_{col} = \overline{V_{col}} = \frac{\dot{m}_{col}}{\rho(T)A_{col}}, \text{ para } R < R_c \quad (10)$$

$$u(x, y, z = 1,42)_{an.sup.} = 0, \text{ para } R_{asi} < R < R_{aie} \quad (11)$$

sendo que o índice *an.inf.* denota a face anular inferior, *col.* denota a face da coluna e *na.sup.* denota a face anular superior, por onde não há entrada de fluido.  $R_{aii}$  e  $R_{aie}$  são, respectivamente, os raios interno e externo da seção anular inferior.  $R_c$  é o raio da coluna.  $R_{asi}$  e  $R_{ase}$  são, respectivamente, os raios interno e externo da seção anular superior.

As temperaturas do fluido nas entradas da coluna da válvula são definidas de acordo com o modelo de perfil de temperatura de poços de produção apresentado no item 3.1 deste documento. Na coluna da válvula é adotada a temperatura na qual o

fluido produzido em zonas inferiores alcança a ICV a ser simulada. Já na região anular, o fluido entra na válvula com temperatura igual à temperatura da formação na profundidade da ICV a ser simulada, conforme as Equações (12) e (13).

$$T(x, y, z = 0)_{col} = T_f|_{ICV} \quad (12)$$

$$T(x, y, z = 0)_{an.inf.} = T_{ei}|_{ICV} \quad (13)$$

Na face de saída da válvula, em vermelho, é definida a condição de pressão manométrica nula e uniforme em toda a superfície, de acordo com a Equação (13).

$$p(x, y, z) = \bar{P} = 0 \quad (14)$$

Nas superfícies em cinza é adotada condição de parede e não deslizamento, conforme Equação (14).

$$u(x, y, z)|_{parede} = 0 \quad (15)$$

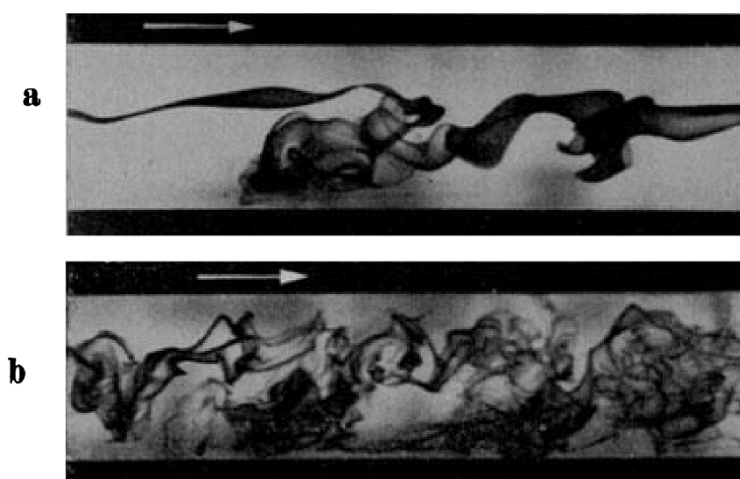
### 3.3 Modelo de turbulência

#### 3.3.1 Decomposição de Reynolds

O número de Reynolds representa a razão entre as forças inerciais e viscosas de um escoamento. Observou-se, experimentalmente, que em escoamentos que apresentam número de Reynolds abaixo do chamado “Reynolds crítico”, camadas de fluido deslizam uma sobre as outras de maneira organizada. Esse regime é chamado de escoamento laminar (Versteeg e Malalasekera, 2007).

Para valores acima do Reynolds crítico, o escoamento passa a apresentar uma sequência de movimentos secundários (“eddies”) de diversas escalas de tamanho. Na Figura 18 é possível observar a transição entre esses dois regimes num tubo graças a injeção de tinta num escoamento que apresenta número de Reynolds próximo de 2000 (Bejan, 2004).

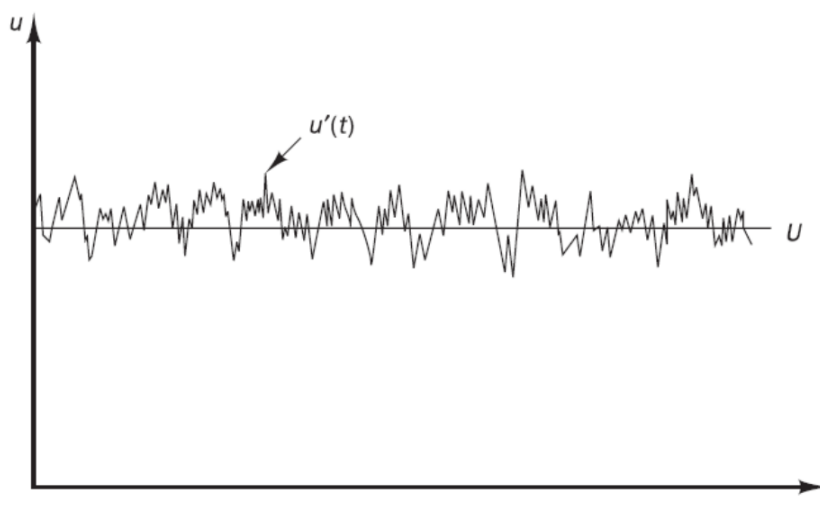
Figura 18: Escoamento na região de transição



Fonte: Bejan (2004)

O comportamento de um escoamento turbulento é intrinsecamente instável mesmo quando condições de contorno constantes são impostas, conforme mostrado na Figura 19.

Figura 19: Medição de velocidade típica em um escoamento turbulento



Fonte: (Versteeg e Malalasekera, 2007)

Velocidade e outras propriedades do escoamento variam de forma caótica e aleatória, o que torna extremamente custoso descrever o movimento de todas as partículas do fluido. Ao invés disso, a velocidade  $u(t)$  descrita na Figura 19 pode ser decomposta em seu valor médio  $\bar{u}$  e a flutuação instantânea aleatória  $u'(t)$ . Tem-se, assim, a decomposição de Reynolds, descrita pela Equação (16). A mesma decomposição pode ser feita para a pressão do escoamento, como na Equação (17).

$$u(t) = \bar{u} + u'(t) \quad (16)$$

$$p(t) = \bar{p} + p'(t) \quad (17)$$

### 3.3.2 Modelo de turbulência k- $\varepsilon$ *Realizable*

Substituindo as Equações (15) e (16) nas equações de conservação de massa e de quantidade de movimento e realizando a média temporal, obtém-se a Média de Reynolds das Equações de Navier-Stokes (Reynolds Averaged Navier-Stokes - RANS). As equações RANS podem ser escritas conforme as Equações (17) e (18).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (19)$$

A Equação (17) descreve a continuidade de massa em um escoamento enquanto a Equação (18) descreve a conservação de quantidade de movimento do sistema. Observa-se na Equação (18) o termo referente ao tensor de Reynolds  $(-\rho \overline{u'_i u'_j})$ , que representa efeitos da turbulência no escoamento.

Os modelos de turbulência RANS utilizam da relação de Boussinesq, descrita pela Equação (20), para calcular o tensor de Reynolds.

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (20)$$

sendo  $\mu_t$  a viscosidade turbulenta e  $k$  a energia cinética turbulenta. Cada modelo aborda o cálculo dessas variáveis de uma forma.

No caso do modelo de turbulência k- $\varepsilon$  *Realizable*, a viscosidade turbulenta é obtida através da Equação (21)

$$\mu_t = \rho k C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (21)$$

sendo que  $C_\mu$  é uma constante adimensional e  $\varepsilon$  é a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta por unidade de massa. A solução da Equação (21) requer cálculo iterativo.

### 3.3.3 Equação de energia

As equações até então apresentadas costumam ser o bastante para resolver a parte do escoamento de um problema de transferência de calor por convecção. A primeira lei da termodinâmica é a equação utilizada para encontrar a distribuição da temperatura no escoamento e resolver a parte da transferência de calor do problema. O software Ansys Fluent resolve a equação de energia como descrito pela Equação (22).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i(\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i(\tau_{ij})_{eff} \right) + S_h \quad (22)$$

$E$  é a energia total,  $k_{eff}$  é a condutividade térmica efetiva e  $(\tau_{ij})_{eff}$  representa a dissipação viscosa do escoamento.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Resultados dos testes de verificação

Testes de verificação foram realizados a fim de avaliar os modelos de turbulência e de transferência de calor aplicados à geometria da válvula de completação e a condições de contorno representativas de fundo de poço, confrontando os resultados obtidos a partir de simulações com dados da literatura. A realização desses testes é importante dada a ausência de validação experimental para a influência da transferência de calor sobre os perfis de temperatura e de pressão de válvulas empregadas em sistemas de completação inteligente do tipo ICV.

#### 4.1.1 Transferência de calor em duto circular e anular

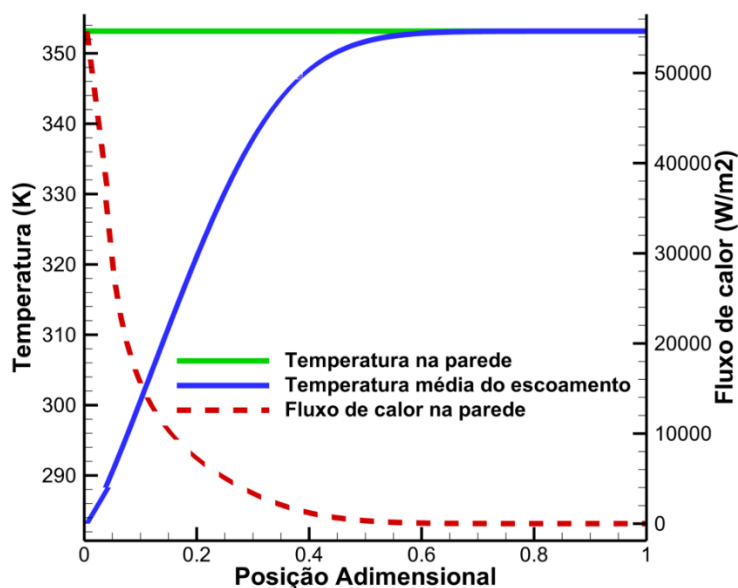
Com o intuito de familiarizar-se com o software e validar o modelo de transferência de calor para escoamento em duto circular e duto anular, foi criada uma situação problema com condições de escoamento, geometria e propriedades do fluido e da superfície definidos. Tanto a condição de parede em temperatura constante quanto a condição de parede com fluxo de calor constante foram simuladas.

Foi simulado um duto de 70 metros de comprimento e 0,01m de diâmetro por onde escoava água a uma velocidade de 0,1 m/s. Na primeira simulação a temperatura da parede foi definida constante e igual a 80°C. A temperatura média do fluido ao longo do escoamento (direção x) e o fluxo de calor na parede foram obtidos na simulação e podem ser observados na Figura 20. O comprimento do duto foi adimensionalizado de acordo com a Equação (23).

$$X = \left( \frac{x/D}{Re Pr} \right)^{1/2} \quad (23)$$

sendo x o valor da posição em metros, D o diâmetro do duto, Re o número de Reynolds e Pr o número de Prandtl.

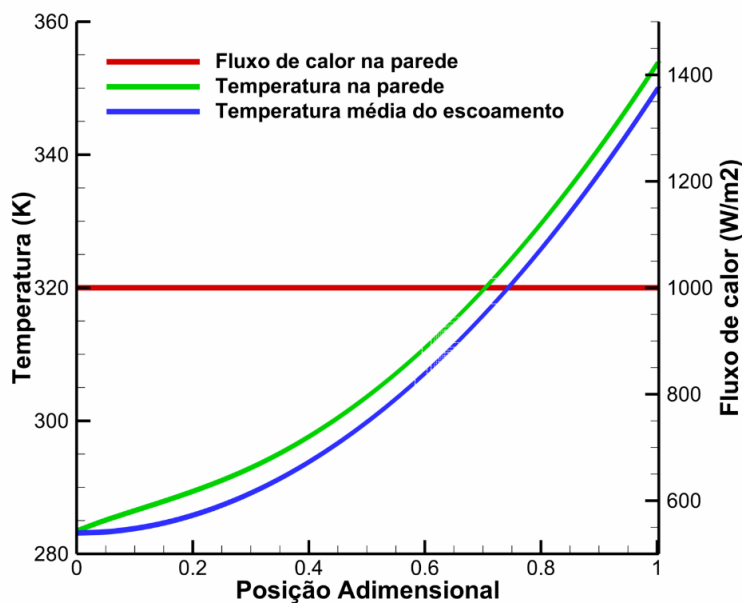
**Figura 20: Temperaturas da parede e do escoamento e fluxo de calor para o escoamento em duto circular com temperatura constante na parede**



Fonte: Autoria própria

Considerando a mesma geometria e velocidade de entrada, uma nova simulação foi feita adotando fluxo de calor uniforme na parede igual a  $1000 \text{ W/m}^2$ . Os perfis de temperatura da água e da parede ao longo do comprimento do duto (direção x) pode ser observado na Figura 21.

**Figura 21: Temperaturas da parede e do escoamento e fluxo de calor para o escoamento em duto circular com fluxo de calor constante na parede**



Fonte: Autoria própria

A partir dos valores obtidos, a Equação (24) foi utilizada para obter o valor do coeficiente de transferência de calor  $h$ , a partir do qual o valor do número de Nusselt é obtido utilizando a Equação (25). Os resultados encontrados foram confrontados com os valores esperados para cada tipo de escoamento, apresentados no capítulo 3 do livro *Convection Heat Transfer*, Bejan (2014).

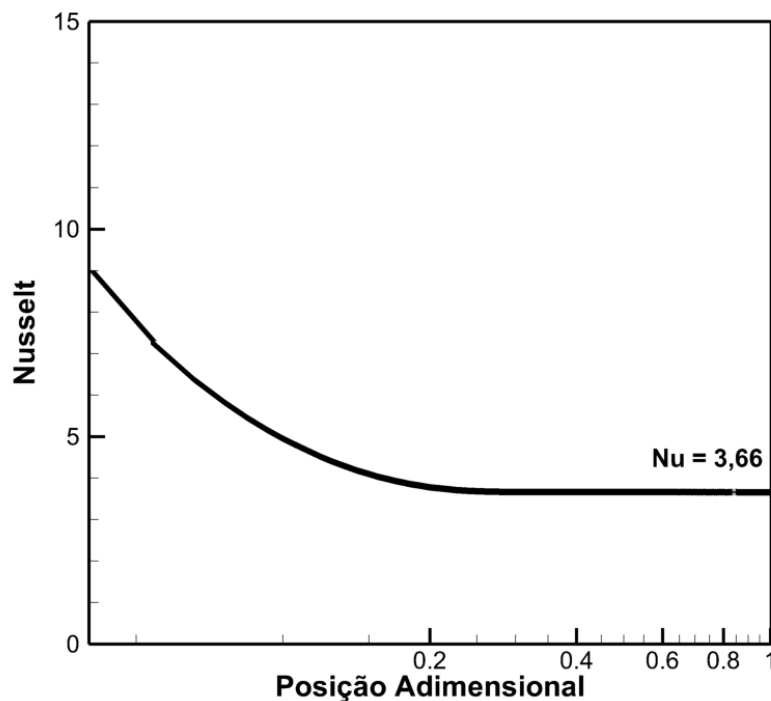
$$q''(x) = h_x(T_{parede} - T_{média}(x)) \quad (24)$$

$$Nu_x = \frac{h D}{k} \quad (25)$$

Em dutos circulares, o valor de Nusselt esperado em um escoamento laminar completamente desenvolvido é de 3,66 para paredes isotérmicas e de 4,36 para paredes com fluxo de calor uniforme (Bejan, 2014).

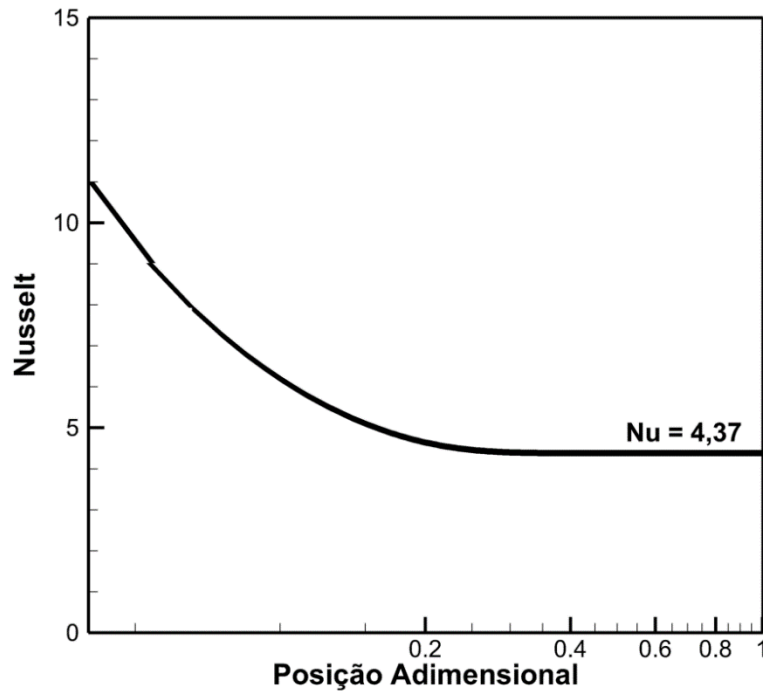
Nos gráficos apresentados nas Figura 22 e Figura 23 é possível observar que os valores obtidos nas simulações estão de acordo com os valores da literatura.

**Figura 22: Número de Nusselt obtidos na simulação de escoamento em duto circular com temperatura constante na parede**



Fonte: Autoria própria

**Figura 23: Número de Nusselt obtidos na simulação de escoamento em duto circular com fluxo de calor uniforme e constante na parede**



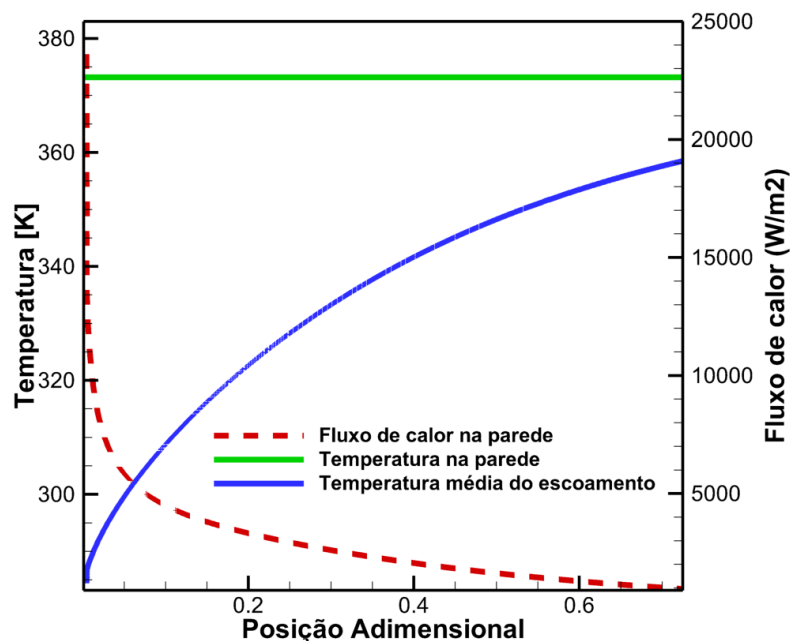
Fonte: Autoria própria

Bae et al. (2014), estudaram numericamente o comportamento de escoamentos laminares em dutos anulares com paredes a temperatura constante para diferentes razões de raio interno e externo. Foi simulado um duto de 80 metros de comprimento formado por dois cilindros concêntricos, com diâmetros de 0,22 m e 0,2 m, por onde escoava etilenoglicol a uma velocidade de 0,1m/s. A temperatura da parede foi definida constante e igual a 100°C. Na Figura 24 é possível observar os valores de fluxo de calor na parede e da temperatura média do fluido ao longo do escoamento obtidos na simulação. O valor da posição adimensional é definido de acordo com a Equação (26):

$$X = \frac{2}{Re Pr} \left( \frac{x}{r_2 - r_1} \right) \quad (26)$$

sendo que os valores de raio interno e externo do duto são representados por  $r_1$  e  $r_2$  respectivamente e  $x$  é a posição ao longo do comprimento do duto.

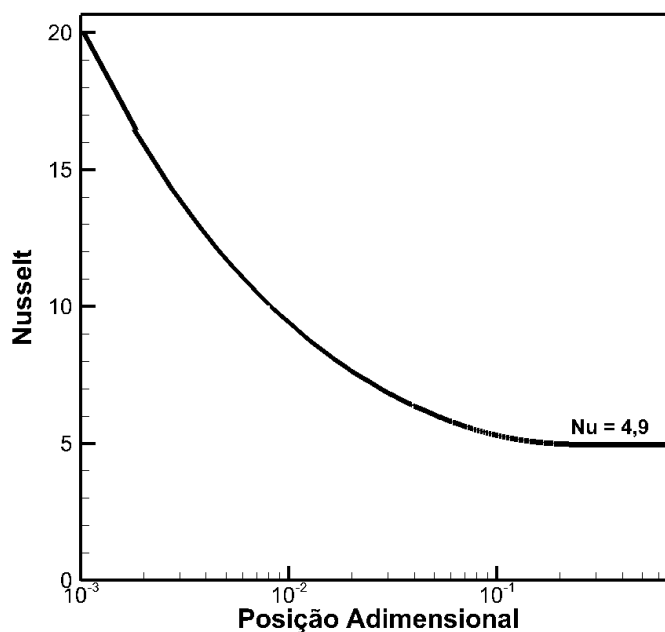
Figura 24: Temperaturas da parede e do escoamento e fluxo de calor para o escoamento em duto anular com temperatura constante na parede.



Fonte: Autoria própria

De acordo com Bae et al. (2014), o valor do número de Nusselt para escoamentos na geometria simulada é igual a 4,9. Utilizando as Equações (24) e (25) a partir dos valores de fluxo de calor e temperatura obtidos obteve-se os valores do número de Nusselt ao longo do duto, dispostos na Figura 25.

Figura 25: Número de Nusselt obtidos na simulação de escoamento em duto anular com temperatura constante na parede



Fonte: Autoria própria

#### 4.1.2 Mistura em T-Junction.

Lin, Chen e Ferng, (2016) estudaram experimentalmente as características da mistura de escoamentos em diferentes temperaturas em uma junta-T. Água quente ( $90^{\circ}\text{C}$ ) escoava por um duto horizontal principal de 400 centímetros de comprimento e 20,8 centímetros de diâmetro e água fria ( $20^{\circ}\text{C}$ ) escoava por um duto secundário de 60 centímetros de comprimento e 2,1 centímetros. A mistura desses escoamentos acontece através de uma junta-T. A Figura 26 é uma foto do aparato experimental utilizado no estudo.

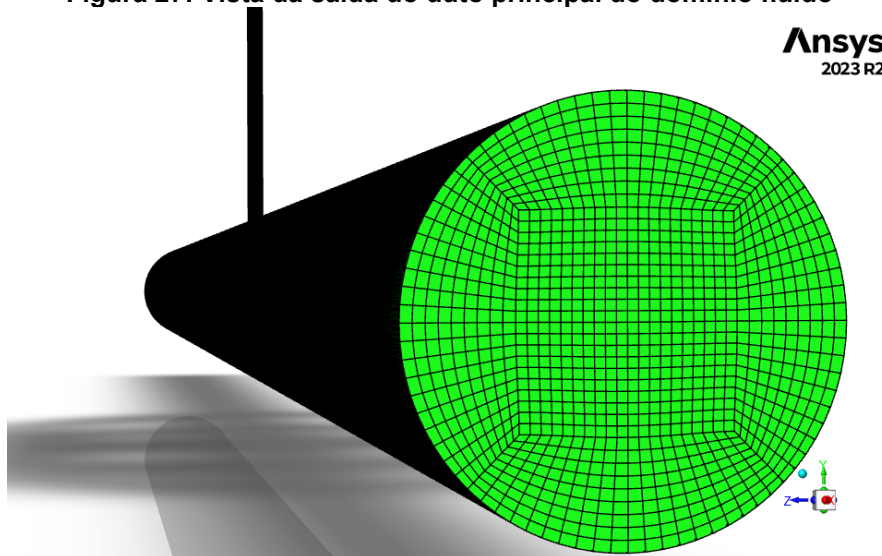
**Figura 26: Aparato experimental**



Fonte: (Lin e Ferng, 2016)

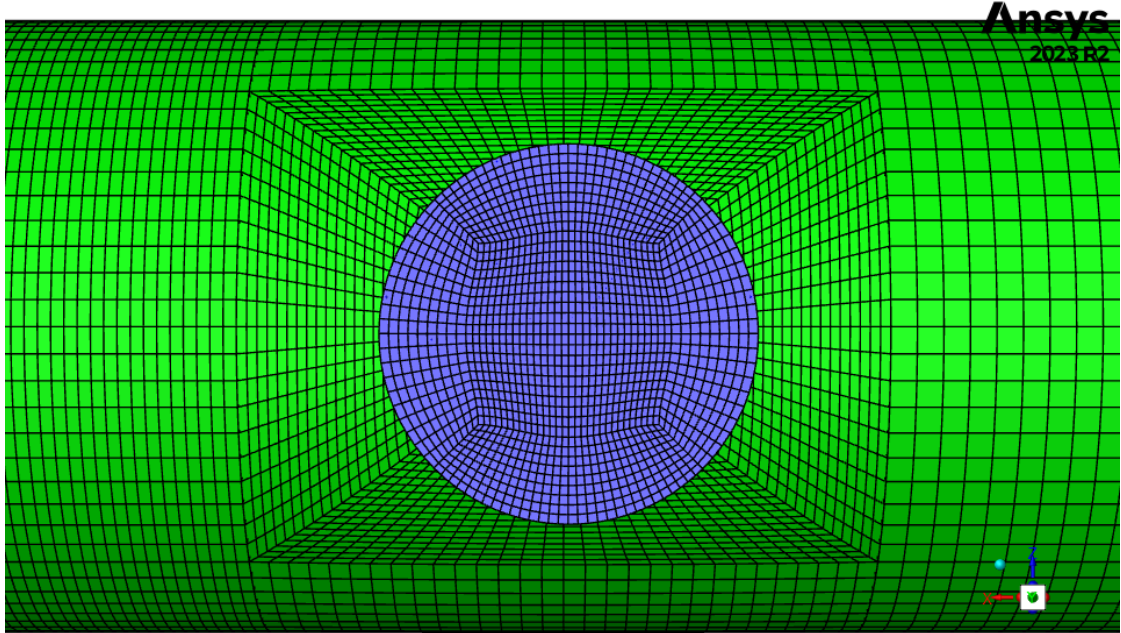
A geometria do domínio fluido foi recriada utilizando o software SpaceClaim. Utilizando o método O-grid, foi gerada a malha do domínio fluido de modo que o valor de  $y^*$  fosse superior a 11,225, respeitando as recomendações dos desenvolvedores do software Ansys Fluent. A malha gerada está disposta nas Figuras 27 e 28.

**Figura 27: Vista da saída do duto principal do domínio fluido**



Fonte: Autoria própria

Figura 28: Vista da entrada do duto secundário do domínio fluido



Fonte: Autoria própria

A vazão no duto primário é igual a 100 litros por minuto, enquanto a vazão no duto secundário é 30 litros por minuto. As condições de velocidade na entrada do duto principal e na entrada do duto secundário podem ser descritas segundo as Equações (27) e (28) respectivamente

$$u(x = -200\text{cm}, y, z)_{\text{principal}} = \overline{V}_{\text{principal}} = \frac{Q_{\text{principal}}}{A_{\text{principal}}} \quad (27)$$

$$u(x, y, z = 70,4\text{cm})_{\text{secundário}} = \overline{V}_{\text{secundário}} = \frac{Q_{\text{secundário}}}{A_{\text{secundário}}} \quad (28)$$

sendo  $Q$  a vazão volumétrica e  $A$  a área da seção transversal do duto. As temperaturas nas entradas podem ser descritas de acordo com as Equações (29) e (30)

$$T(x = -200\text{cm}, y, z)_{\text{principal}} = T_{\text{principal}} = 90^{\circ}\text{C} \quad (29)$$

$$T(x, y, z = 70,4\text{cm})_{\text{secundário}} = T_{\text{secundário}} = 20^{\circ}\text{C} \quad (30)$$

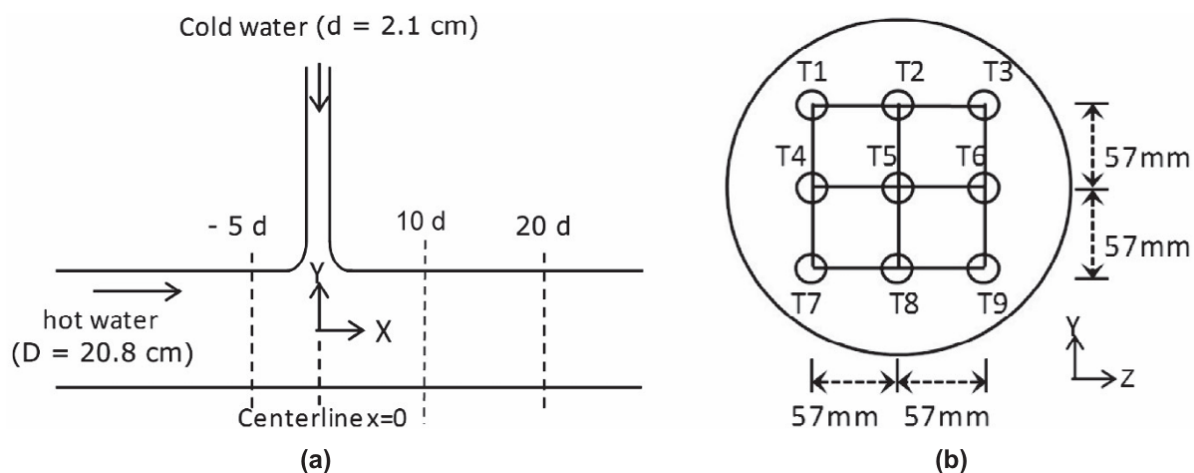
Na saída do equipamento, é definida a condição de pressão manométrica nula e uniforme em toda a superfície e nas paredes é adotada condição de não deslizamento, conforme Equações (31) e (32), respectivamente.

$$p(x, y, z) = \bar{P} = 0 \quad (31)$$

$$u(x, y, z)|_{\text{parede}} = 0 \quad (32)$$

Termostatos são instalados no duto principal, dispostos de acordo com a Figura 29.

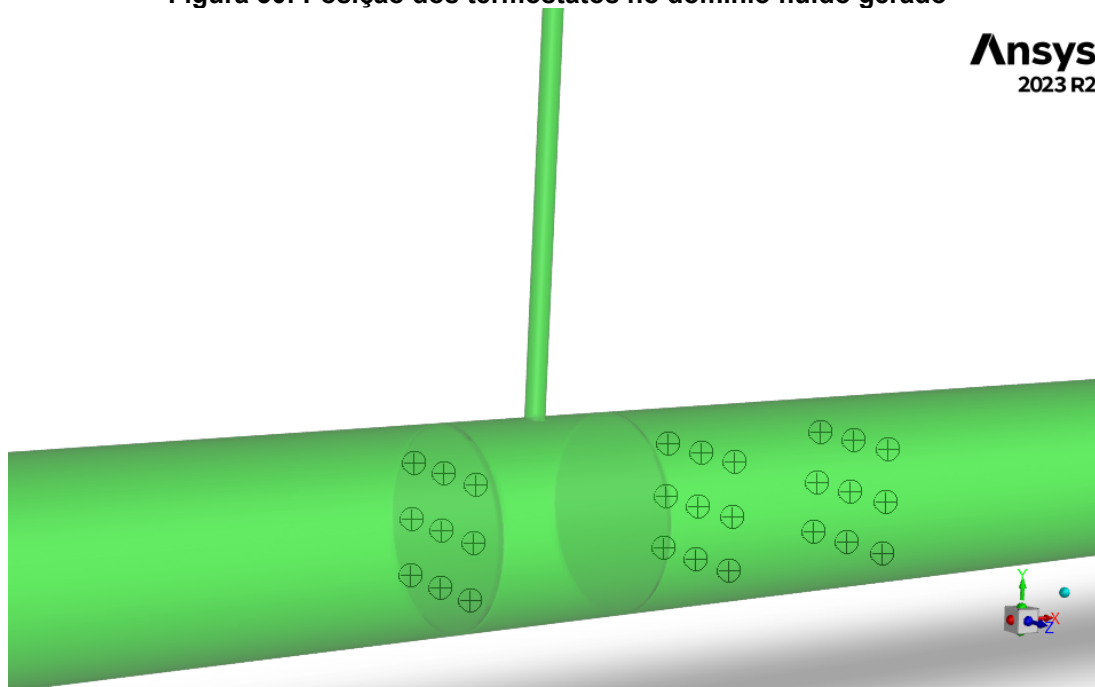
**Figura 29: Disposição dos termostatos no aparato experimental: (a) vista lateral; (b) seção transversal**



Fonte: (Lin, Chen e Ferng, 2016)

A posição dos termostatos foi replicada no domínio fluido gerado, como mostrado na Figura 30

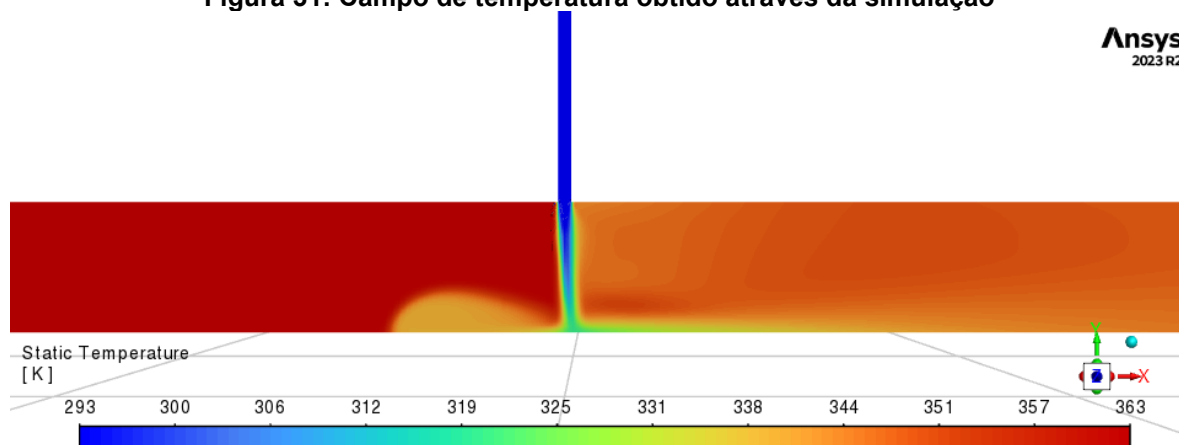
**Figura 30: Posição dos termostatos no domínio fluido gerado**



Fonte: Autoria própria

O modelo de turbulência adotado foi o  $k-\epsilon$  *Realizable*. O campo de temperatura obtido a partir da simulação está disposto na Figura 31.

Figura 31: Campo de temperatura obtido através da simulação

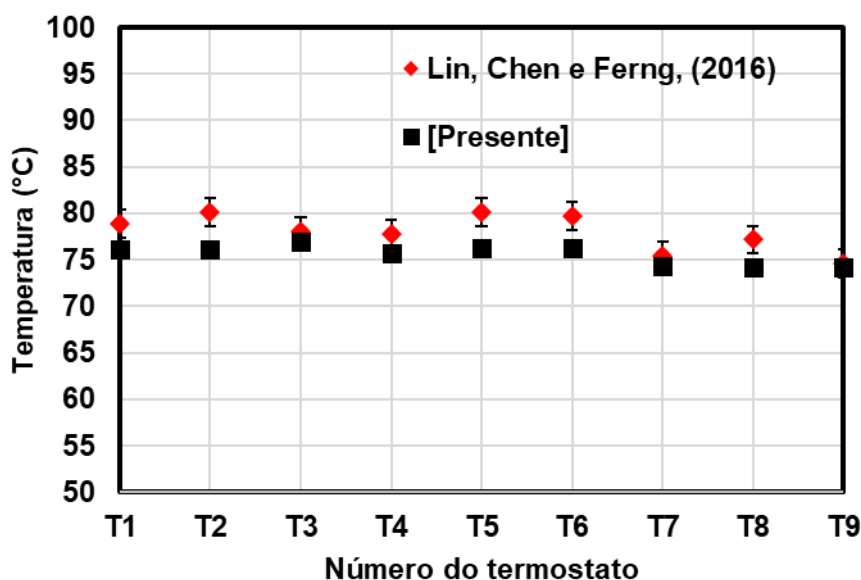


Fonte: Autoria própria

Assim como no experimento realizado por Lin, Chen e Ferng, (2016), observou-se que o fluido frio escoava na direção oposta à do escoamento principal logo que se misturam, fenômeno chamado *backflow*.

O erro medido dos termostatos utilizados nos experimentos é de  $\pm 1.5$  °C. A Figura 32 mostra a comparação entre as temperaturas no comprimento  $x=20d$  obtidas pela simulação e as observadas experimentalmente por Lin, Chen e Ferng, (2016).

Figura 32: Comparação entre as temperaturas no comprimento obtidas pela simulação e as observadas experimentalmente em  $x=20d$



Fonte: Autoria própria

Em ambos os casos se observou uma boa mistura dos fluidos, atingindo uma temperatura relativamente uniforme no comprimento  $x=20d$ .

## 4.2 Parâmetros do problema

Foram analisados dois cenários de produção. Em ambos onde a produção total de petróleo é igual a 40.000 barris por dia, no entanto, no primeiro cenário, 1/8 da vazão total é produzido na zona da ICV 1, 3/8 da vazão total são produzidos na zona da ICV 2 e metade da vazão total é produzida na zona da ICV 3. No segundo cenário, 1/3 da vazão mássica total é produzida por cada zona. O objetivo é avaliar a diferença que a proporção de produção de cada zona causa no perfil de temperatura do poço.

### 4.2.1 Condições do contorno do poço

A simulação considerou um poço hipotético com condições de contorno do reservatório baseadas no estudo de caso de um poço de produção offshore da Petrobrás apresentado por Ferreira et al. (2017). Os parâmetros de produção do poço e as configurações do poço estão dispostas na Tabela 2.

**Tabela 2: Parâmetros de produção e configuração do poço**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Vazão total	40.000 bbl/d
Profundidade do mar (cabeça de poço)	1.387 m
Comprimento simulado (do fundo do poço até a cabeça de poço)	2.503 m
Temperatura no fundo do poço (em 3.890 m)	123,7 °C
Temperatura do leito do mar (em 1387 m)	4°C
Ângulo de inclinação	0
Profundidade da ICV 1	3.890 m
Profundidade da ICV 2	3.090 m
Profundidade da ICV 3	2.190 m
Gradiente geotérmico	0,04782 °C/m
Diâmetro interno da coluna de produção	0,098 m
Diâmetro externo da coluna de produção	0,1143 m
Diâmetro interno do revestimento	0,1441 m
Diâmetro externo do revestimento	0,1683 m
Diâmetro do poço	0,1905 m
Material da coluna de produção e do revestimento	Aço 316
Tipo de formação rochosa	Xisto
Calor específico do xisto (Ferreira et al.,2017)	2.151 J/kg.K
Condutividade térmica do xisto (Ferreira et al.,2017)	1,599 W/m.K
Difusividade térmica do xisto (Ferreira et al.,2017)	3.612 e-07 m <sup>2</sup> /s
Massa específica do fluido produzido em condições-padrão	800 kg/m <sup>3</sup>

**Fonte: Autoria própria**

A vazão total de óleo é de 40.000 barris por dia. No primeiro cenário 1/8 da vazão mássica total é produzido na zona da ICV 1, 3/8 da vazão mássica total são produzidos na zona da ICV 2 e metade da vazão mássica total é produzida na zona da ICV 3. No segundo cenário, 1/3 da vazão mássica total é produzida por cada zona.

A baixa vazão na ICV 1 do primeiro cenário foi adotada considerando a existência de algum fator que diminuísse a vazão da zona como, por exemplo, um defeito na válvula ou uma precipitação de carbonato de cálcio nas paredes da válvula (incrustação).

Uma vez que as propriedades do fluido variam com a temperatura, a divisão de vazão entre as zonas foi feita considerando a vazão mássica. Em condições-padrão, a vazão volumétrica de 40.000 barris por dia representa uma vazão mássica de 58,884 kg/s. Esse valor foi distribuído entre as ICVs conforme apresentado na Tabela 3 e na Tabela 4 considerando as condições de operação nos dois cenários.

**Tabela 3: Vazão mássica de óleo produzido em cada zona produtora no primeiro cenário**

Primeiro cenário (diferentes vazões mássicas em cada zona produtora)			
Vazão mássica total	Vazão mássica Zona 1 (1/8 da produção)	Vazão mássica Zona 2 (3/8 da produção)	Vazão mássica Zona 3 (1/2 da produção)
58,884 kg/s	7,360 kg/s	22,082 kg/s	29,442 kg/s

Fonte: Autoria própria

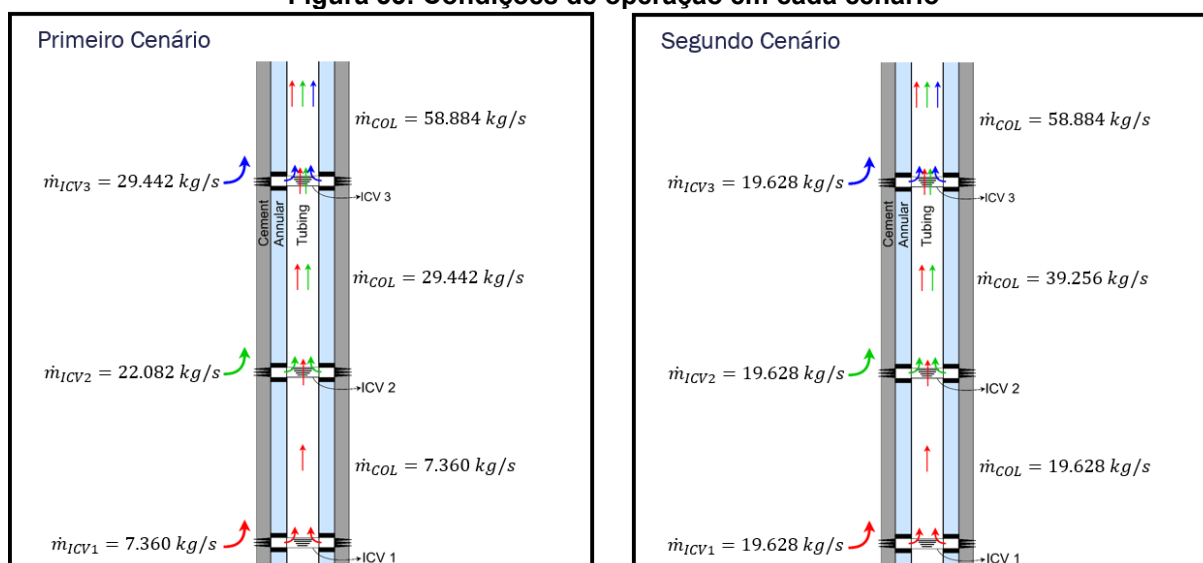
**Tabela 4: Vazão mássica de óleo produzido em cada zona produtora no segundo cenário**

Segundo cenário (vazão mássica total dividida igualmente entre as três zonas)			
Vazão mássica total	Vazão mássica Zona 1 (1/3 da produção)	Vazão mássica Zona 2 (1/3 da produção)	Vazão mássica Zona 3 (1/3 da produção)
58,884 kg/s	19,628 kg/s	19,628 kg/s	19,628 kg/s

Fonte: Autoria própria

Nos diagramas apresentados na Figura 33,  $\dot{m}_{ICV}$  representa a vazão mássica de fluido produzido na zona indicada e  $\dot{m}_{COL}$  representa a vazão mássica de fluido produzido escoando na coluna de produção do poço.

**Figura 33: Condições de operação em cada cenário**



Fonte: Autoria própria

#### 4.2.2 Parâmetros do problema das simulações em CFD

Apenas as válvulas onde ocorre mistura de fluidos em diferentes temperaturas foram simuladas em CFD, portanto, foram realizadas quatro simulações no total, duas para cada cenário.

Como discutido no capítulo de Formulação matemática, as velocidades de entrada nas válvulas foram adotadas de acordo com a vazão mássica de fluido produzido em cada zona, sendo que a produção da zona onde a ICV está instalada entra na válvula pela região anular e o fluido produzido por zonas anteriores entra pela coluna de produção. As vazões mássicas em cada região da válvula estão dispostas na Tabela 5.

**Tabela 5: Vazões mássicas em cada região da ICV**

<b>Primeiro cenário (diferentes vazões mássicas em cada zona produtora)</b>			
	$\dot{m}_{ICV2}$		$\dot{m}_{ICV3}$
Região Anular	22,082 kg/s	Região Anular	29,442 kg/s
Coluna ( $\dot{m}_{ICV1}$ )	7,360 kg/s	Coluna ( $\dot{m}_{ICV1} + \dot{m}_{ICV2}$ )	29,442 kg/s
<b>Segundo cenário (vazão mássica total dividida igualmente entre as três zonas)</b>			
	$\dot{m}_{ICV2}$		$\dot{m}_{ICV3}$
Região Anular	19,628 kg/s	Região Anular	19,628 kg/s
Coluna ( $\dot{m}_{ICV1}$ )	19,628 kg/s	Coluna ( $\dot{m}_{ICV1} + \dot{m}_{ICV2}$ )	39,256 kg/s

**Fonte: Autoria própria**

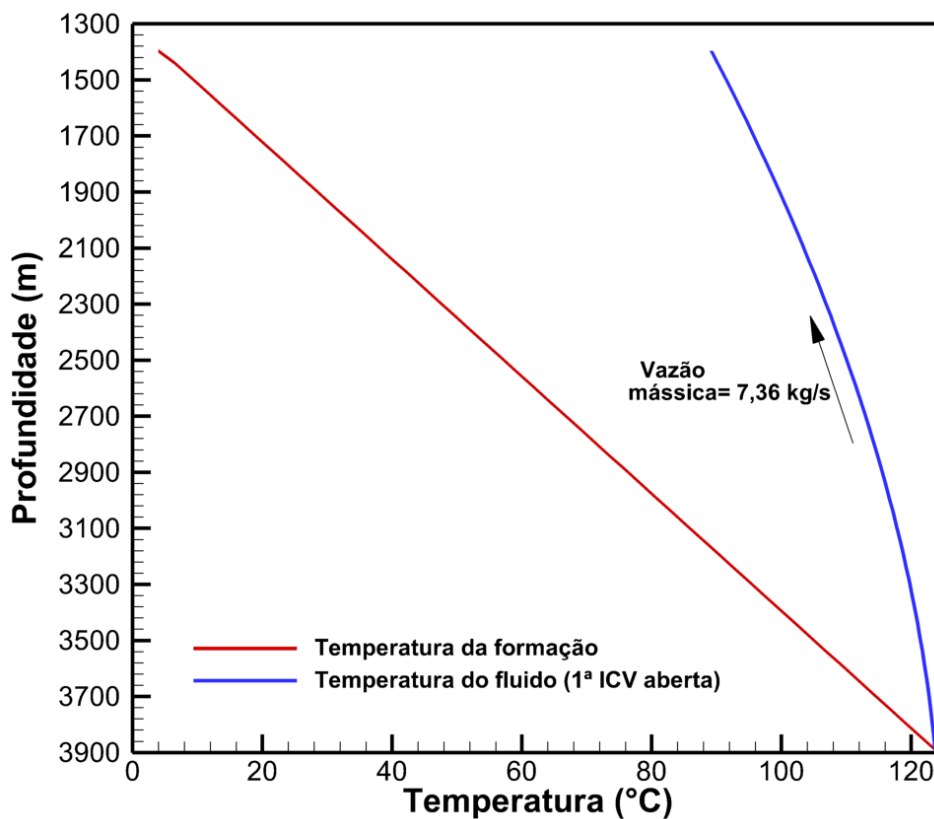
Para obter a velocidade de entrada em cada uma das regiões da válvula é necessário conhecer a temperatura na qual o fluido chega na ICV, uma vez que a massa específica do óleo varia com a temperatura. Para isso, é necessário simular o poço. O processo de obtenção dos valores de temperatura e velocidades de entrada do óleo na válvula serão explicados no próximo item.

### 4.3 Resultados do caso em estudo

#### 4.3.1 Primeiro Cenário de produção

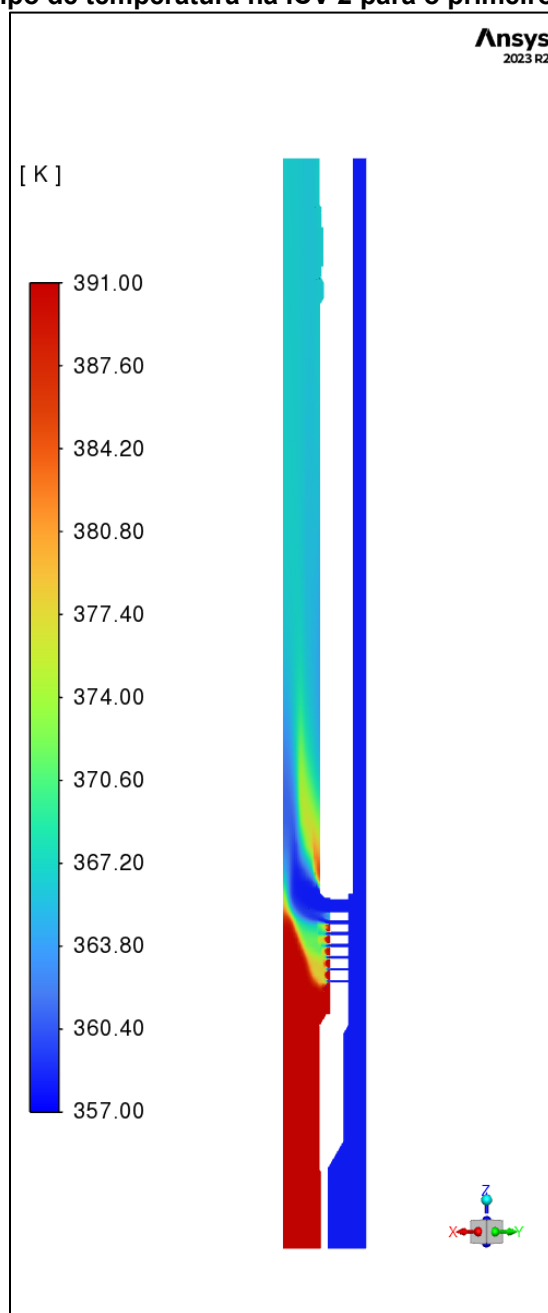
Para o primeiro cenário, o poço é inicialmente simulado considerando como aberta apenas a válvula mais profunda (ICV 1), produzindo óleo a uma vazão mássica igual a 7,360 kg/s. O perfil de temperatura do fluido obtido a partir desta simulação inicial é mostrado na Figura 34. Nessas condições, o fluido alcançaria a cabeça do poço a uma temperatura de 89,240°C.

Figura 34: Perfil de temperatura para o primeiro cenário com apenas a ICV 1 totalmente aberta



Fonte: Autoria própria

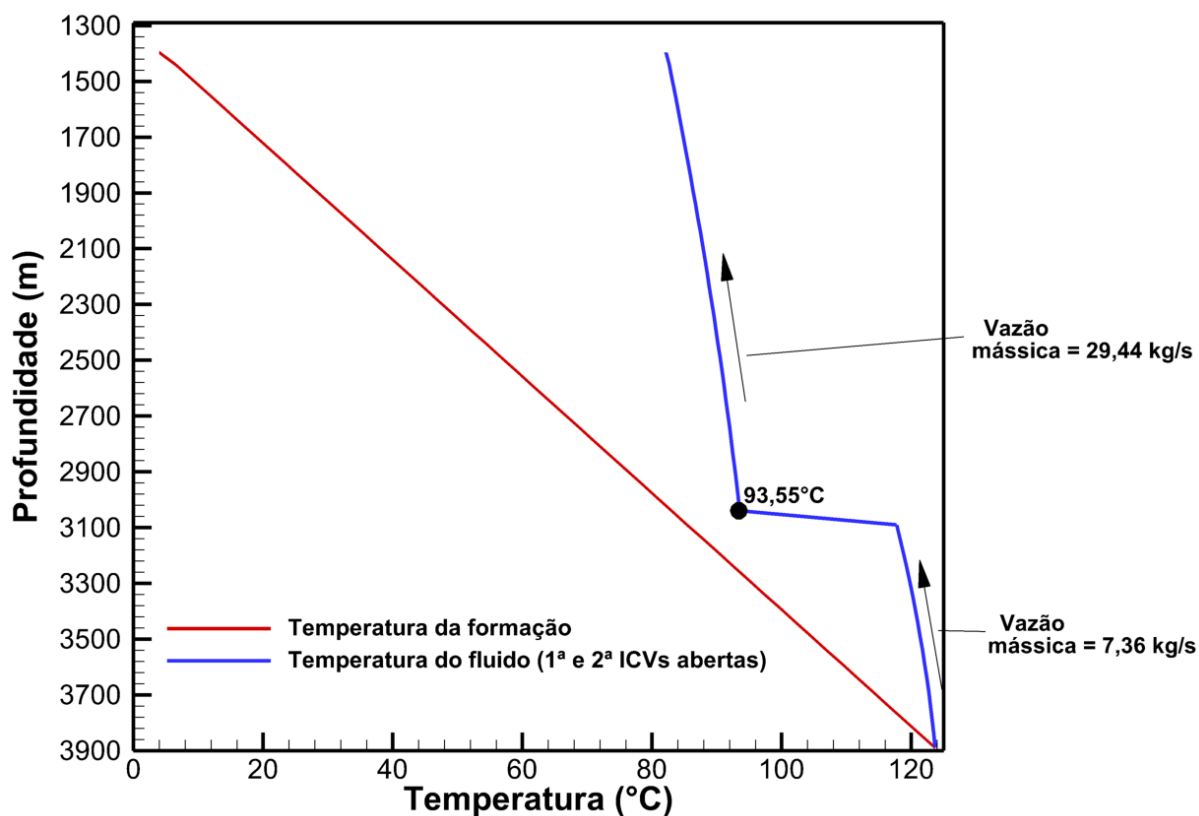
É possível observar na Figura 34 que o fluido chega na segunda válvula (ICV 2 a 3.090 metros de profundidade) a uma temperatura de 117,588°C. A temperatura da formação neste ponto é igual a 85,288°C. Como discutido anteriormente, assume-se que o fluido que entra na região anular da válvula tem temperatura igual à formação. Com os valores de temperatura, calculam-se os valores de massa específica do fluido e, em seguida, as velocidades de entrada em cada região das válvulas. Esses valores são utilizados como entrada na simulação CFD. O campo de temperatura simulado na ICV 2 é mostrado na Figura 35.

**Figura 35: Campo de temperatura na ICV 2 para o primeiro cenário**

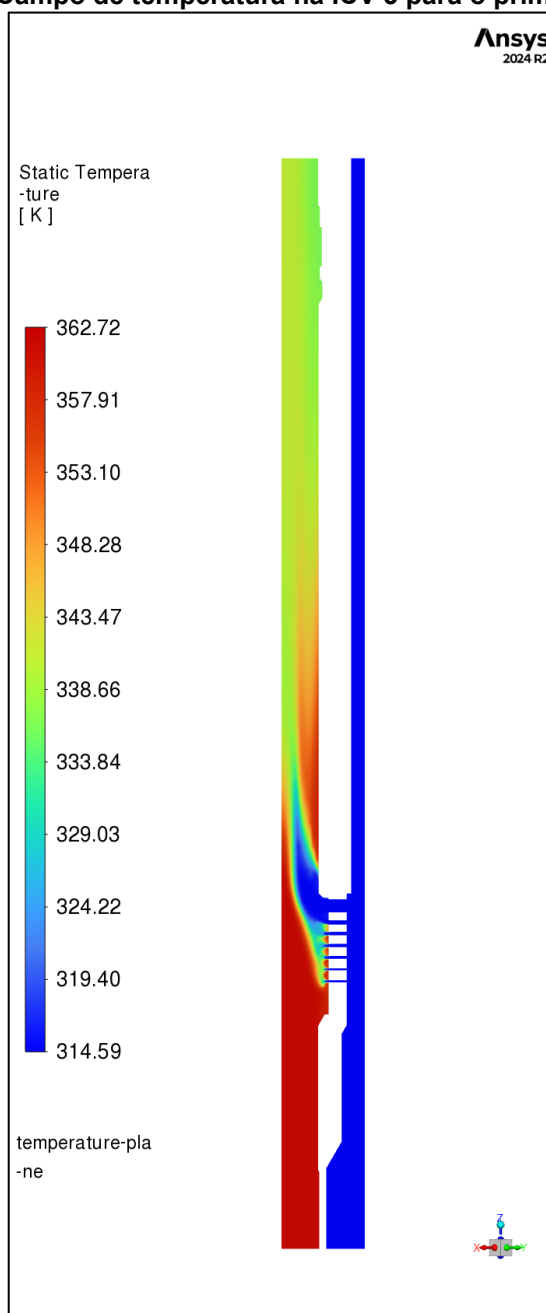
Fonte: Autoria própria

A partir da simulação CFD, obtém-se a temperatura média na saída da válvula, 93,55°C. Esse valor é utilizado no modelo de perfil de temperatura do poço para que se calcule a temperatura do fluido acima da ICV 2, agora considerando a vazão mássica de 29,442 kg/s na coluna de produção. A Figura 36 mostra o perfil de temperatura considerando as válvulas ICV 1 e ICV 2 como totalmente abertas.

Figura 36: Perfil de temperatura para o primeiro cenário com a ICV 1 e ICV 2 totalmente abertas



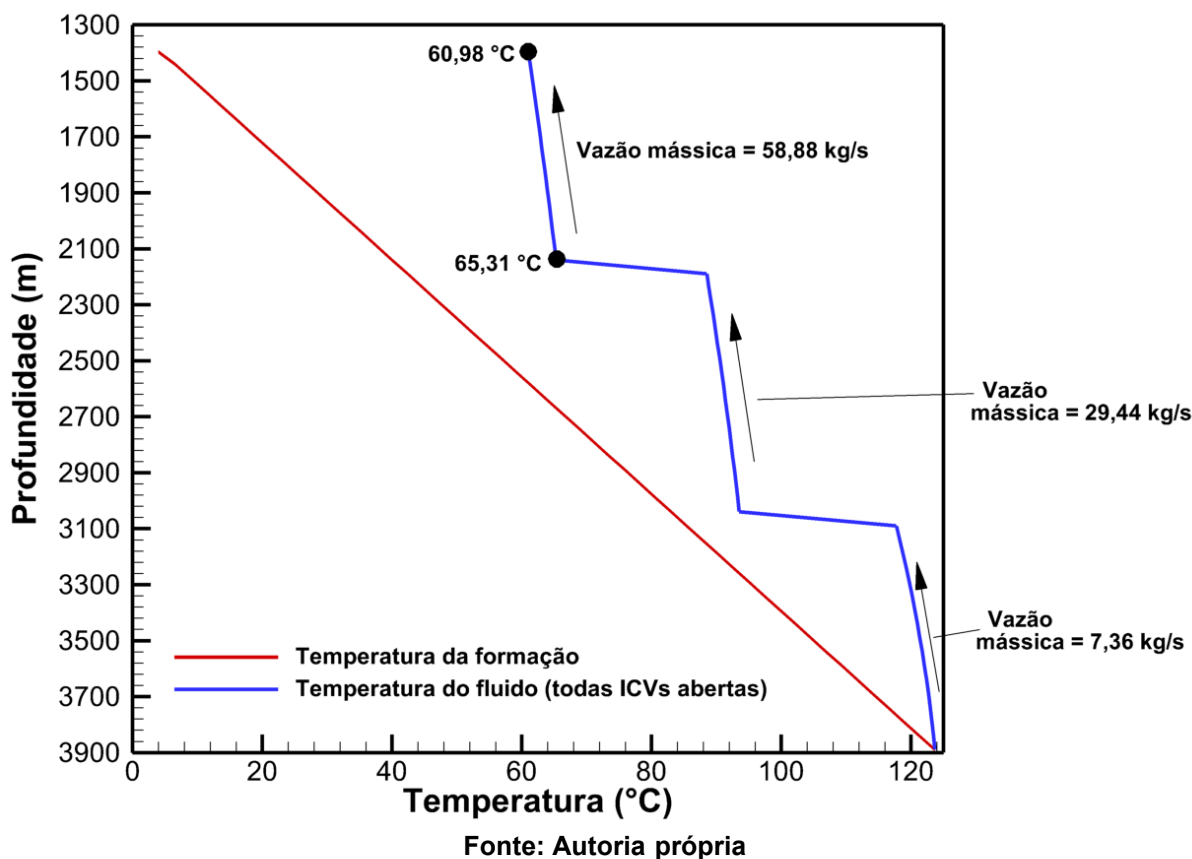
De acordo com o novo perfil de temperatura, o fluido produzido nas zonas 1 e 2 chega na ICV 3 (2.190 metros de profundidade) a temperatura de 88,535 °C, enquanto a temperatura da formação nessa profundidade é igual à 42,075 °C. De maneira similar à realizada para a ICV 2, esses valores são utilizados como entrada na simulação em CFD, assumindo que a temperatura do fluido na região anular é igual à da formação. O campo de temperatura simulado na ICV 2 é mostrado na Figura 37.

**Figura 37: Campo de temperatura na ICV 3 para o primeiro cenário**

Fonte: Autoria própria

O fluido na saída da válvula tem temperatura igual a  $65,31^{\circ}\text{C}$ . Esse valor é incorporado ao perfil de temperatura do poço, permitindo, finalmente, o cálculo da temperatura do fluido ao longo do poço quando todas as ICVs estão totalmente abertas. O perfil de temperatura obtido está disposto na Figura 38.

Figura 3839: Perfil de temperatura para o primeiro cenário com todas as válvulas 2 totalmente abertas

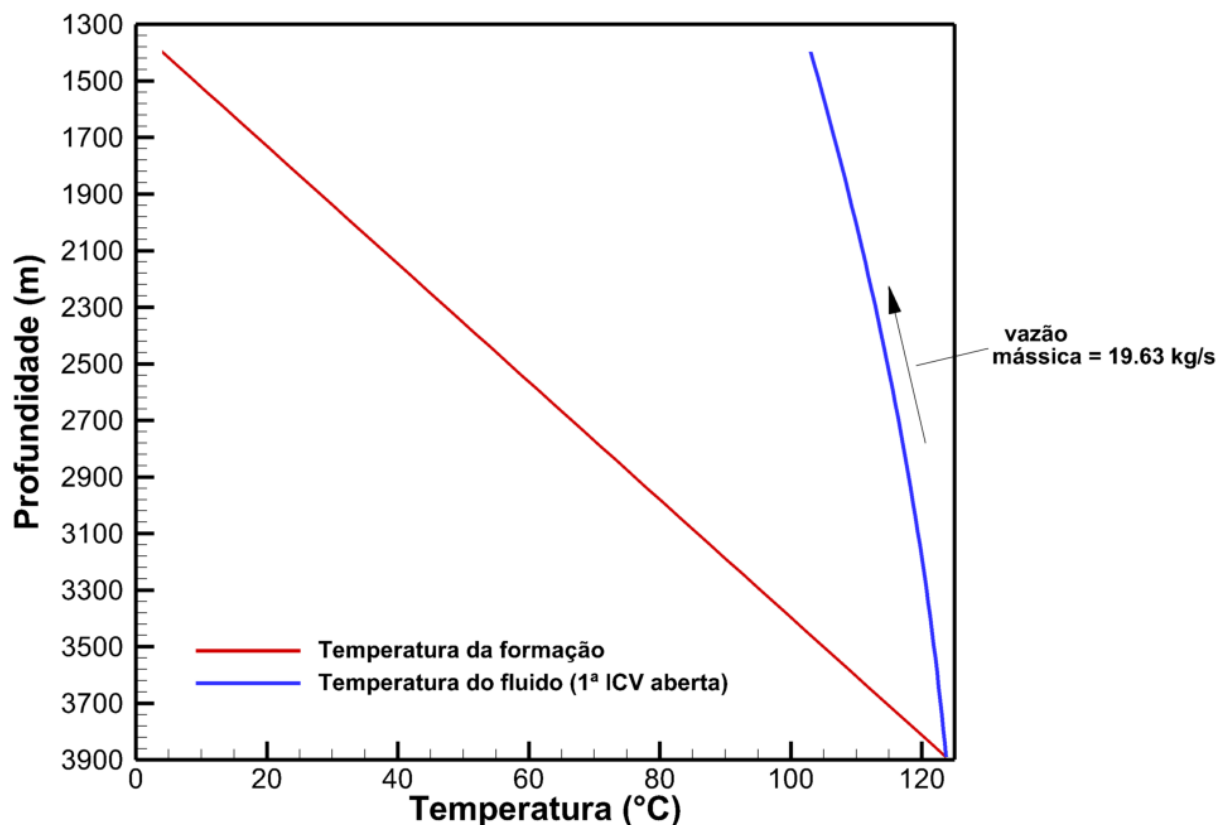


No primeiro cenário, a temperatura do fluido na cabeça é de 60,98°C.

#### 4.3.2 Segundo Cenário de produção

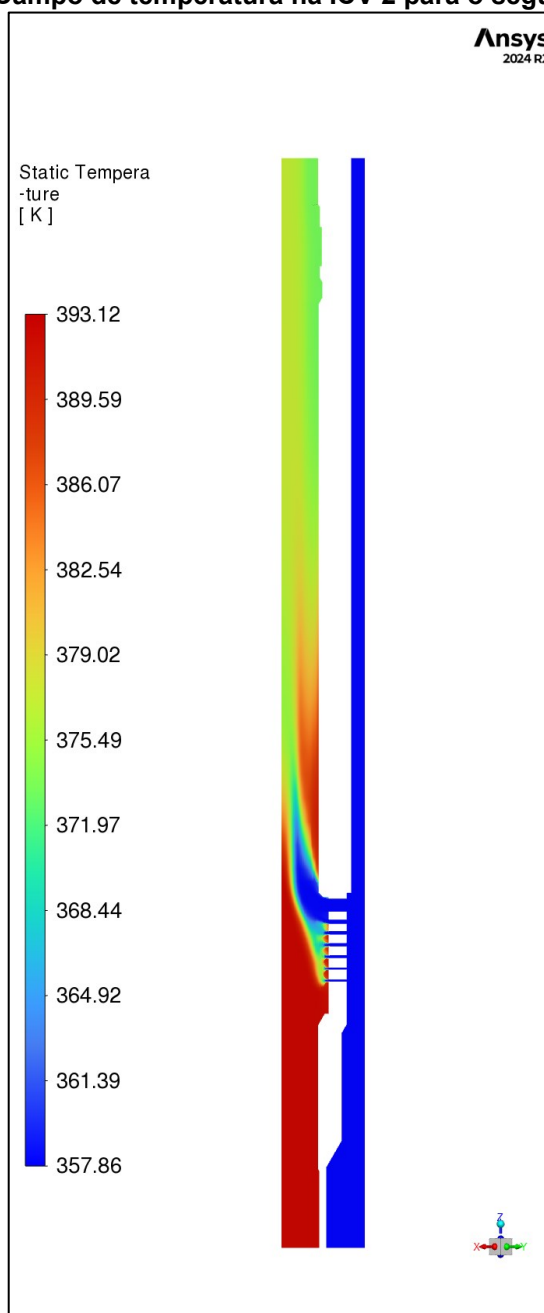
A metodologia para obtenção do perfil de temperatura do segundo cenário é igual à utilizada no primeiro cenário. O poço é inicialmente simulado considerando como aberta apenas a válvula mais profunda (ICV 1), produzindo óleo a uma vazão mássica igual a 19,628 kg/s. o perfil de temperatura do fluido obtido a partir desta simulação inicial é mostrado na Figura 40. Nessas condições, o fluido alcançaria a cabeça do poço a uma temperatura de 103,016°C.

Figura 40: Perfil de temperatura para o segundo cenário com apenas a ICV 1 totalmente aberta



Fonte: Autoria própria

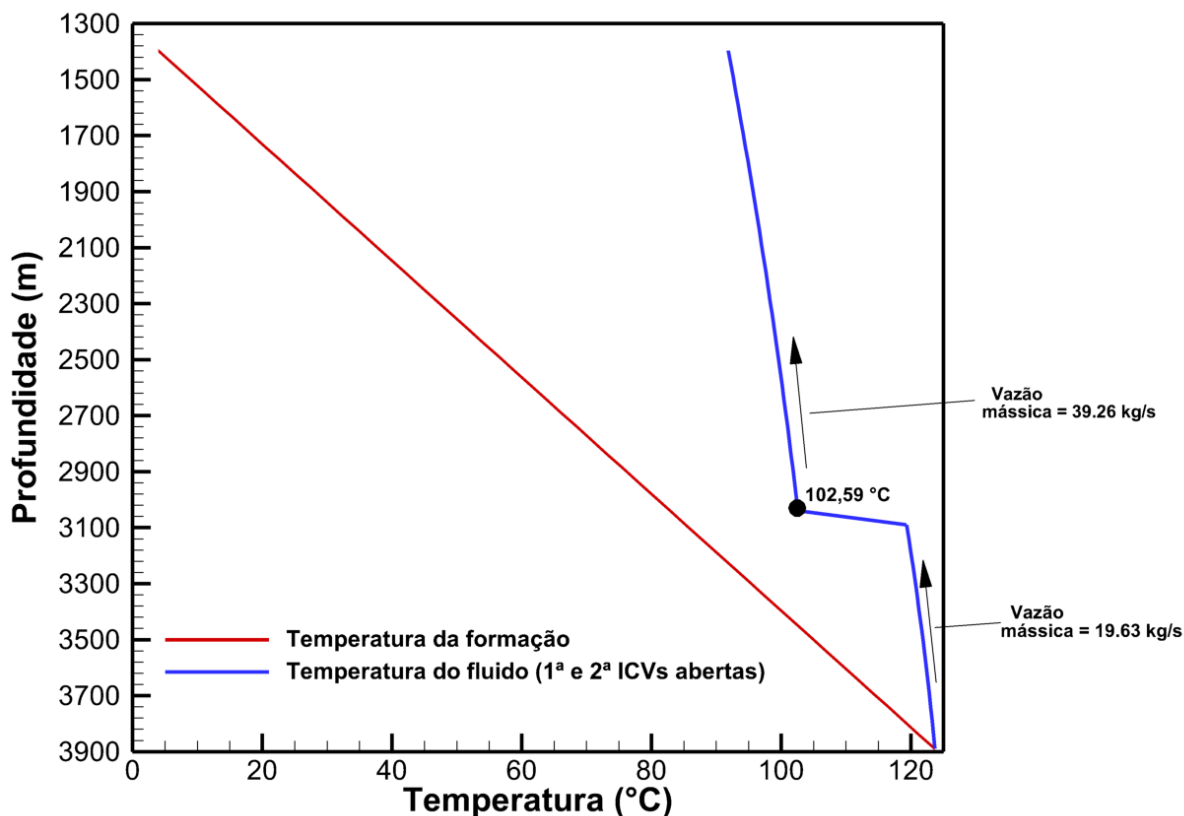
É possível observar na Figura 40 que o fluido chega na segunda válvula (ICV 2 a 3.090 metros de profundidade) a uma temperatura de 119,362°C. A temperatura da formação neste ponto é igual a 85,288°C. Como discutido anteriormente, assume-se que o fluido que entra na região anular da válvula tem temperatura igual à formação. Com os valores de temperatura, calculam-se os valores de massa específica do fluido e, em seguida, as velocidades de entrada em cada região das válvulas. Esses valores são utilizados como entrada na simulação CFD. O campo de temperatura simulado na ICV 2 é mostrado na Figura 41.

**Figura 41: Campo de temperatura na ICV 2 para o segundo cenário**

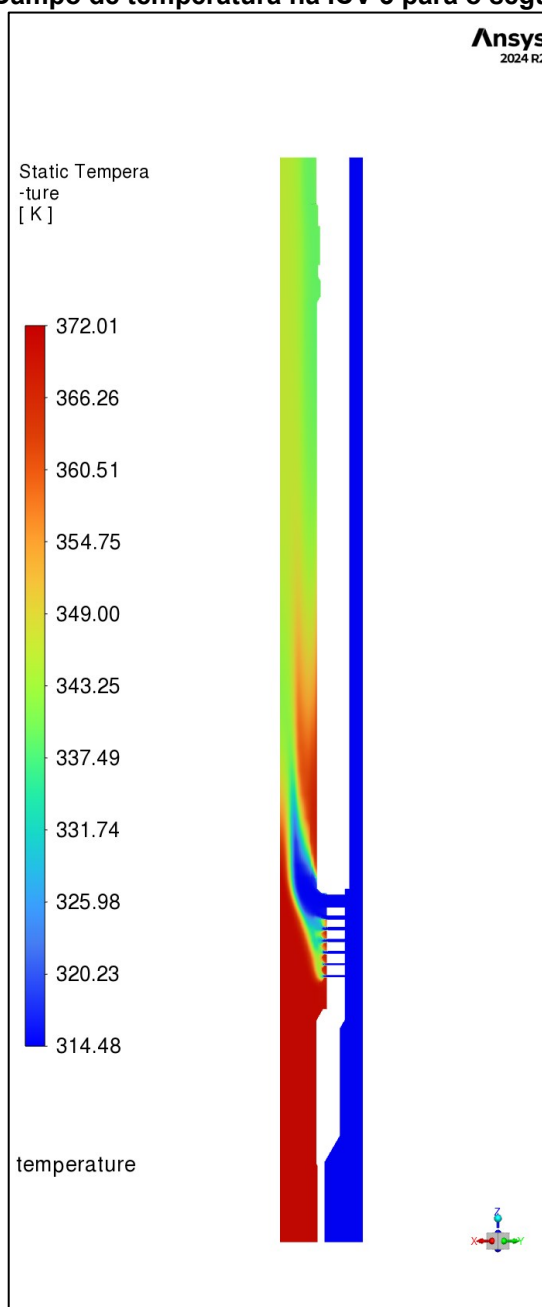
Fonte: Autoria própria

A partir da simulação CFD, obtém-se a temperatura média na saída da válvula, 102,59°C. Esse valor é utilizado no modelo de perfil de temperatura do poço para que se calcule a temperatura do fluido acima da ICV 2, agora considerando a vazão mássica de 39,256 kg/s na coluna de produção. A Figura 42 mostra o perfil de temperatura considerando as válvulas ICV 1 e ICV 2 como totalmente abertas.

Figura 42: Perfil de temperatura para o segundo cenário com a ICV 1 e ICV 2 totalmente abertas



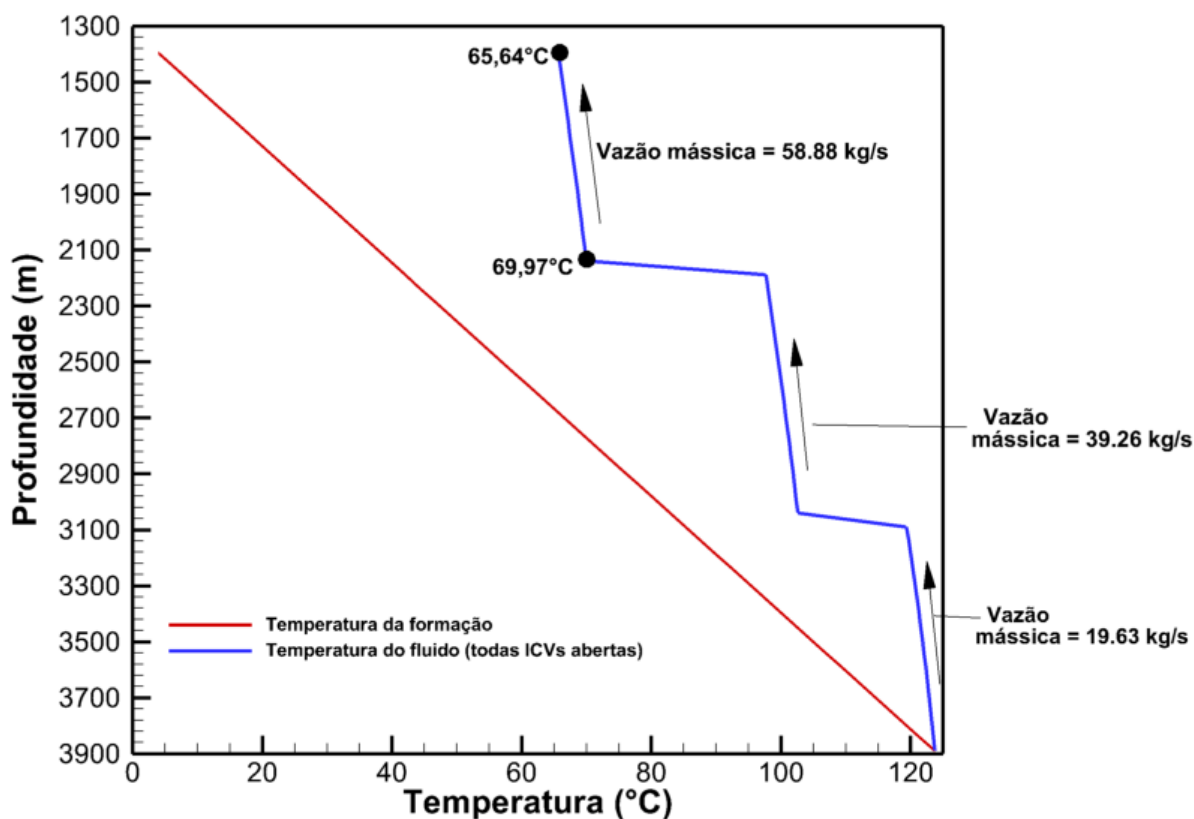
De acordo com o novo perfil de temperatura, o fluido produzido nas zonas 1 e 2 chegam na ICV 3 (2.190 metros de profundidade) a temperatura de 97,658 °C, enquanto a temperatura da formação nessa profundidade é igual à 42,075 °C. De maneira similar à realizada para a ICV 2, esses valores são utilizados como entrada na simulação em CFD, assumindo que a temperatura do fluido na região anular é igual à da formação. O campo de temperatura simulado na ICV 2 é mostrado na Figura 37.

**Figura 43: Campo de temperatura na ICV 3 para o segundo cenário**

Fonte: Autoria própria

O fluido na saída da válvula tem temperatura igual a 69,97°C. Esse valor é incorporado ao perfil de temperatura do poço, permitindo, finalmente, o cálculo da temperatura do fluido ao longo do poço quando todas as ICVs estão totalmente abertas. O perfil de temperatura obtido está disposto na Figura 44.

Figura 44: Perfil de temperatura para o segundo cenário com todas as válvulas 2 totalmente abertas

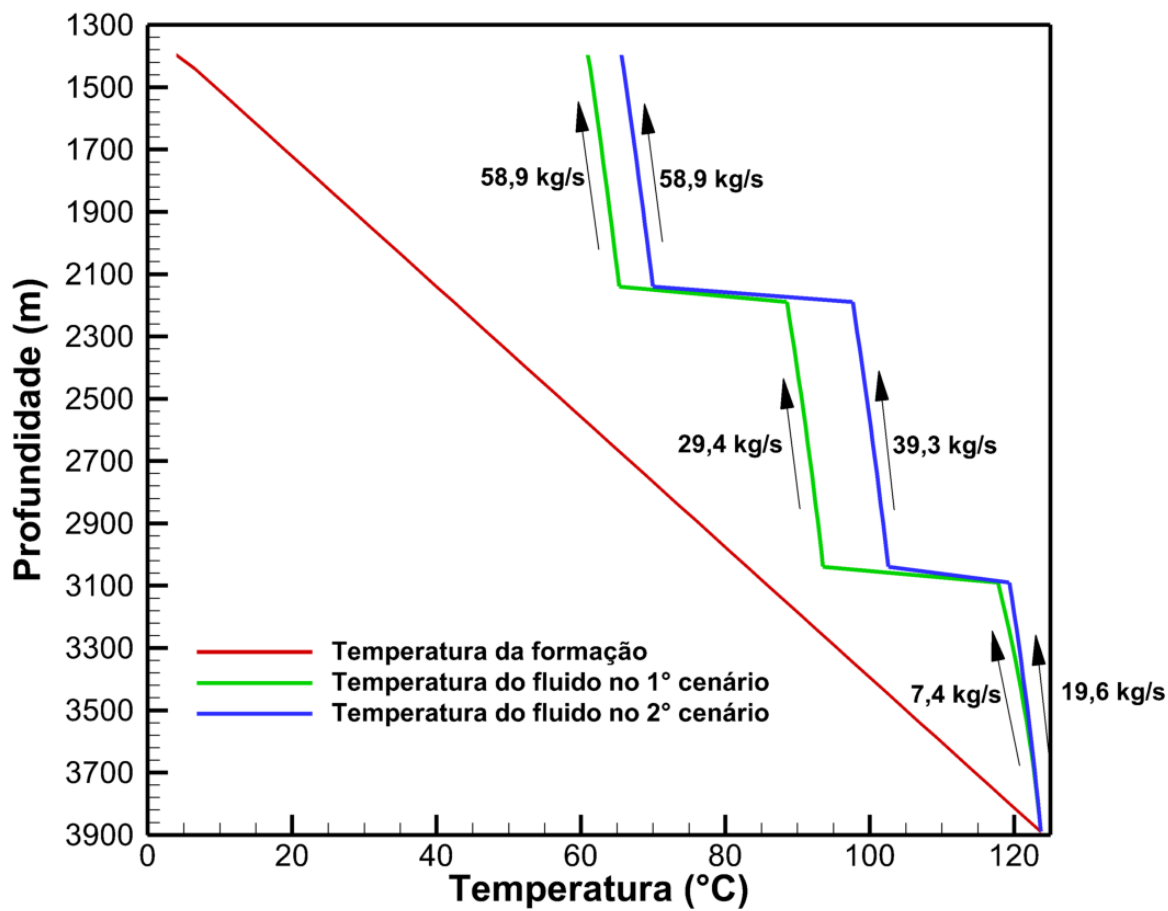


No segundo cenário, a temperatura do fluido na cabeça é de 65,64°C.

#### 4.3.3 Comparação entre os dois cenários de produção simulados

No gráfico da Figura 45 é possível observar a comparação entre os dois perfis de temperatura. A diferença de temperatura na cabeça do poço entre os dois cenários é de 4,66°C, porém a diferença de temperatura mais significativa é observada entre as zonas de produção 2 e 3, onde essa diferença chega a quase 10°C.

Figura 45: Perfis de temperatura para os dois cenários de produção



Fonte: Autoria própria

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi investigado e discutido o comportamento do escoamento em válvulas ICV em um poço vertical de produção de petróleo utilizando simulações de Dinâmica dos Fluidos Computacional a partir do modelo de turbulência  $k-\varepsilon$  *Realizable* em conjunto com um modelo de perfil de temperatura para fluidos com propriedades dependentes da temperatura. As simulações demonstraram que cenários de produções que apresentam a mesma vazão total podem ter perfis de temperatura consideravelmente diferentes de acordo com a razão da produção em cada zona produtora. Tal constatação mostra que é possível utilizar o perfil de temperatura de um poço para identificar as condições de produção esperadas e compará-las com as observadas em campo, permitindo identificar possíveis irregularidades na produção. O modelo pode ser utilizado em conjunto com modelos de perfis de pressão para identificar essas irregularidades, aumentando a capacidade de avaliar a produção e permitindo tomadas de decisões mais embasadas e certas.

## REFERÊNCIAS

- BAE, Y. et al. Numerical analysis of thermal development of laminar flow in a concentric multilayer annulus. **Chemical engineering & technology**, v. 37, n. 1, p. 123–130, 2014.
- BEGGS, H. D.; ROBINSON, J. R. Estimating the viscosity of crude oil systems. **Journal of petroleum technology**, v. 27, n. 09, p. 1140–1141, 1975.
- BEJAN, A. **Convection Heat Transfer**. 4. ed. Nashville, TN, USA: John Wiley & Sons, 2013.
- BYRNE, M. et al. **Computational Fluid Dynamics for reservoir and well fluid flow performance modelling**. SPE European Formation Damage Conference. **Anais...SPE**, 2011.
- BYRNE, M. T. et al. **Modelling well inflow potential in three dimensions using computational fluid dynamics**. All Days. **Anais...SPE**, 2010.
- CHARLES, Y. O.; IGBOKOYI, A. O. **Temperature prediction model for flowing distribution in wellbores and pipelines**. All Days. **Anais...SPE**, 2012.
- FERREIRA, M. V. et al. A numerical study on the thermal behavior of wellbores. **SPE production & operations**, v. 32, n. 04, p. 564–574, 2017.
- FLUENT, A. **Ansys Fluent Theory Guide**. [s.l.] ANSYS Inc., 2021.
- FURRER, D. U.; SEMIATIN, S. L. (EDS.). **Metals Process Simulation**. [s.l.] ASM International, 2010.
- HUGHES, B. **Sliding sleeves**. Disponível em: <<https://www.bakerhughes.com/pt-br/node/38116>>. Acesso em: 5 fev. 2025.
- JAMIESON, D. T. et al. Physical properties of sea water solutions: heat capacity. **Desalination**, v. 7, n. 1, p. 23–30, 1969.
- JOUBRAN, J. **Intelligent completions: Design and reliability of interval control valves in the past, present, and future**. Day 4 Thu, May 03, 2018. **Anais...OTC**, 2018.

KUTASOV, I. M.; EPPELBAUM, L. V. **Pressure and temperature well testing**. Londres, England: CRC Press, 2019.

LI, Z.; ZHU, D. **Optimization of production with ICV by using temperature data feedback in horizontal wells**. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. **Anais...SPE**, 2010.

LIE, O. H.; WALLACE, W. **Intelligent recompletion eliminates the need for additional well**. All Days. **Anais...SPE**, 2000.

LIN, C. H.; CHEN, M. S.; FERNG, Y. M. Investigating thermal mixing and reverse flow characteristics in a T-junction by way of experiments. **Applied thermal engineering**, v. 99, p. 1171–1182, 2016.

LIN, C. H.; FERNG, Y. M. Investigating thermal mixing and reverse flow characteristics in a T-junction using CFD methodology. **Applied thermal engineering**, v. 102, p. 733–741, 2016.

LIVESCU, S. et al. A fully-coupled thermal multiphase wellbore flow model for use in reservoir simulation. **Journal of petroleum science & engineering**, v. 71, n. 3–4, p. 138–146, 2010.

MANSURE, A. J. **Hot oiling spreadsheet**. [s.l.] Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 1996.

MATHIAS, M. F. **Análise do sistema inteligente de completção e sua aplicabilidade na indústria do petróleo**. Niterói - RJ: Universidade Federal Fluminense, 2013.

MITCHELL, R. F.; H.F., W. **Prediction of downhole temperatures can be key for optimal wellbore design**. Proceedings of SPE Production Operations Symposium. **Anais...Society of Petroleum Engineers**, 1989.

MOHAMMED, H. S.; SULTAN, H. S.; KHAZAL, E. A. Simulation of a perforated vertical wellbore with near wall porous media effect. **Journal of Petroleum Research and Studies**, v. 12, n. 1, p. 85–104, 2022a.

MOHAMMED, H.; SULTAN, H.; KHAZAL, E. Thermal analysis of a perforated vertical wellbore. **Basrah journal for engineering science**, v. 22, n. 2, p. 10–15, 2022b.

MORES, M. H. **Análise Fluidodinâmica em Válvulas SSV por Simulação Numérica**. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2021.

MUBARAK, S.; DAWOOD, N.; SALAMY, S. **Lessons learned from 100 intelligent wells equipped with multiple downhole valves**. SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium. **Anais...SPE**, 2009.

NUMBERE, D.; BRIGHAM, W.; STANDING, M. **Correlations for physical properties of petroleum reservoir brines**. [s.l.] Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 1977.

OKWANANKE, A.; ISEHUNWA, S. O. Analysis of water cresting in horizontal wells. 2009.

OZBEK, H.; PHILLIPS, S. L. **Thermal conductivity of aqueous NaCl solutions from 20°C to 330°C**. [s.l.] Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 1979. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2172/6269880>>.

RAMEY, H. J., Jr. Wellbore heat transmission. **Journal of petroleum technology**, v. 14, n. 04, p. 427–435, 1962.

RAMÍREZ, J.; ZAMBRANO, A.; RATKOVICH, N. Prediction of temperature and viscosity profiles in heavy-oil producer wells implementing a downhole induction heater. **Processes (Basel, Switzerland)**, v. 11, n. 2, p. 631, 2023.

REN, Y. et al. Characteristics and correlations of rock components, structure, and physical properties of deep clastic reservoirs in the LD-X area of Yinggehai basin, western South China Sea. **Marine and petroleum geology**, v. 167, n. 106995, p. 106995, 2024.

RODRIGUEZ, J. C.; FIGUEROA, A. R. **Intelligent completions and horizontal wells increase production and reduce free-gas and water in mature fields**. All Days. **Anais...SPE**, 2010.

SAGAR, R.; DOTY, D. R.; SCHMLDT, Z. Predicting temperature profiles in a flowing well. **SPE production engineering**, v. 6, n. 04, p. 441–448, 1991.

SANTOYO, E. et al. Effective thermal conductivity of Mexican geothermal cementing systems in the temperature range from 28°C to 200°C. **Applied thermal engineering**, v. 21, n. 17, p. 1799–1812, 2001.

SATTARIN, M., MODARRESI, H., BAYAT, M. AND TEYMORI, M. New viscosity correlations for dead crude oils. **Petroleum & Coal**, v. 49, n. 2, p. 33–39, 2007.

SCHLUMBERGER. **formación de crestas**. Disponível em: <<https://glossary.slb.com/es/terms/c/cresting>>. Acesso em: 15 set. 2023b.

SCHNITZLER, E. et al. **100th intelligent completion installation: A milestone in Brazilian pre-salt development**. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. **Anais...SPE**, 2019.

SILVER FOX COMPLETION SERVICES. **Sxa (up)**. Disponível em: <<https://silver-fox.net/downhole-tools/flow-control/sliding-sleeves/sxa-up/>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

SOLUTION, G. W. **Flow Control Tools**. Disponível em: <<https://gulfoffwell.ae/products/downhole-tools/flow-control-tools/>>. Acesso em: 21 nov. 2023.

STONE, T. W.; EDMUNDS, N. R.; KRISTOFF, B. J. **A Comprehensive Wellbore/Reservoir Simulator**. SPE Symposium on Reservoir Simulation. **Anais...SPE**, 1989.

SUI, D.; HORPESTAD, T.; WIKTORSKI, E. Comprehensive modeling for temperature distributions of production and geothermal wells. **Journal of petroleum science & engineering**, v. 167, p. 426–446, 2018.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. [s.l.] Interciência, 2004.

VERSTEEG, H.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method**. 2. ed. Filadélfia, PA, USA: Prentice Hall, 2007.

WOOLEY, G. R. Computing downhole temperatures in circulation, injection, and production wells. **Journal of petroleum technology**, v. 32, n. 09, p. 1509–1522, 1980.

WRIGHT, W. **Simple Equations to Approximate Changes to the Properties of Crude Oil with Changing Temperature**. Disponível em: <<https://www.jmcampbell.com/tip-of-the-month/2014/04/simple-equations-to-approximate-changes-to-the-properties-of-crude-oil-with-changing-temperature/>>. Acesso em: 6 fev. 2025.

XU, J. et al. Prediction of temperature and pressure distribution in HTHP injection gas wells with thermal effect of wellbore. **Petroleum science and technology**, v. 31, n. 14, p. 1423–1438, 2013.

YADAV, V.; SURYA, N. **Evaluating the performance of intelligent completions**. All Days. **Anais...SPE**, 2012.

ZAREA, M.; ZHU, D. **An integrated performance model for multilateral wells equipped with inflow control valves**. SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition. **Anais...SPE**, 2011.

ZHANG, X. et al. Study on temperature distribution of perforated horizontal wellbore. **Journal of thermal science**, v. 29, n. 1, p. 194–205, 2020.