

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**WELLINGTON BETENCURTE DA SILVA**

**OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS ATIVOS DE ISOLAMENTO TÉRMICO  
MULTICAMADAS**

**Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.**

**Orientador: Prof. Marcelo José Colaço – D. C.**

**Rio de Janeiro  
2008**

c2008

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro - RJ      CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do autor e dos orientadores.

G586o Silva, Wellington Betencurte  
Otimização de sistemas ativos de isolamento térmico multicamadas / Wellington Betencurte da Silva. – Rio de Janeiro: IME, 2008.

XVII, 131p.: il.,

Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, 2008.

1. Transferência de calor.      2. Otimização.  
3. Pipe-in-pipe

I. Título II. Instituto Militar de Engenharia

CDD 536.2

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**WELLINGTON BETENCURTE DA SILVA**

**OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS ATIVOS DE ISOLAMENTO TÉRMICO  
MULTICAMADAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Marcelo José Colaço – D.C.

Aprovada em 11 de fevereiro de 2008 pela seguinte Banca Examinadora:

---

Prof. Marcelo José Colaço – D. C. do IME - Presidente

---

Cap. Aldélio Bueno Caldeira – D. C. do IME

---

Prof. Francesco Scofano Neto – D. C. do IME

---

Prof. Manuel Ernani de Carvalho Cruz – Ph.D. da UFRJ

Rio de Janeiro  
2008

Dedico este trabalho aos meus pais José Bernardino da Silva e Wanda de O. Betencurte da Silva e ao meu irmão Wallace Betencurte da Silva.

À minha namorada e companheira, Aline Bittencourt Furlan, com todo meu amor.

Dedico essa tese a meu grande irmão e amigo Rondinely Bittencourt dos Santos, pelo apoio nos momentos mais difíceis de minha vida e por sempre estar comigo. Que saudade, muitas saudades de você. Te amo!

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, José Bernardino da Silva e Wanda de O. Betencurte da Silva e aos meus irmãos Wallace Betencurte da Silva e Rondinely Bittencourt dos Santos, por sempre terem me apoiado e incentivado.

A CAPES pelo suporte financeiro, através de bolsa de mestrado.

Ao Prof. Adélio Bueno Caldeira pela enorme ajuda, estando sempre disponíveis para eventuais dúvidas e discussões.

Ao Prof. Su Jian pela enorme ajuda na parte teórica desse trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Marcelo José Colaço, pelo apoio, orientação e amizade.

Aos pesquisadores do laboratório de Aerodinâmica do IME, em especial a Ana Cláudia Magalhães e Mônica Motta Gomes pela compreensão quanto ao uso de vários computadores simultaneamente.

A ESTECO e ESSS Companies, especialmente Dr. Carlo Poloni, Dr. Nader Fateh, e Sr. Rodrigo Ferraz por prover acesso livre a software de modeFRONTIER®.

Ao grande amor da minha vida, Aline Bittencourt Furlan. Você vive em meu coração! Obrigado por tudo que você fez mim. Te amo!!

Aos Amigos Luciana Melhorim Vicente, Poliana Bittencourt Furlan Peccine, Bruno Detesfani Mazocco, Carlos Alberto Costa, Jaqueline Volpato Bittencourt, Leandro Peccine, Jandeir Furlan, Cilma Bittencourt Furlan, Fernando Fioresi e Maria José de Oliveira pelo apoio.

A todos, que de uma maneira ou de outra contribuíram para a conclusão deste trabalho, meu muito obrigado.

"Sempre me pareceu estranho que todos aqueles que estudam seriamente esta ciência acabam tomados de uma espécie de paixão pela mesma. Em verdade, o que proporciona o máximo de prazer não é o conhecimento e sim a aprendizagem, não é a posse, mas a aquisição, não é a presença mas o ato de atingir a meta."

CARL FRIEDRICH GAUSS

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	9	
LISTA DE TABELAS .....	11	
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	13	
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>21</b>
2.1	Sistema Pipe-in-pipe .....	21
2.2	Otimização do Sistema Pipe-in-pipe .....	30
<b>3</b>	<b>PROBLEMA DIRETO.....</b>	<b>33</b>
3.1	Primeira Etapa .....	34
3.2	Definição de Novas Variáveis.....	35
3.3	Formulação Matemática para Primeira Etapa .....	36
3.4	Segunda Etapa .....	39
3.5	Formulação Matemática para Segunda Etapa .....	40
3.6	Solução Numérica .....	43
<b>4</b>	<b>OTIMIZAÇÃO.....</b>	<b>48</b>
4.1	Otimização mono-objetivo .....	48
4.2	Soluções de Pareto .....	49
4.3	Otimização Multi-objetivo .....	51
4.4	Diferenças entre Otimização multi-objetivo e Otimização de mono-objetivo....	51
4.5	Descrição dos Métodos de Otimização .....	52
4.5.1	Teoria dos jogos Multi-Objetivos (MOGT) .....	52
4.5.1.1	<i>Teoria dos jogos</i> .....	52
4.5.1.2	<i>Simplex</i> .....	53
4.5.1.3	<i>Algoritmo Nash-Simplex</i> .....	54
4.5.2	Algoritmo Multi-Objetivo Recozimento Simulado (MOSA) .....	56
4.5.2.1	<i>Algoritmo Multi-objetivo</i> .....	57
4.5.3	Algoritmo Genético Multi-objetivos com Intervalo Adaptativo (ARMOGA) ...	58

4.6	Superfície de Respostas.....	60
4.7	A programação feita no software modeFrontier® .....	61
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>64</b>
5.1	Condução de calor em Multicamadas .....	64
5.1.1	Problema de condução de calor com duas camadas.....	64
5.1.2	Problema de condução de calor com N camadas .....	68
5.1.3	Problema de condução de calor com N camadas com aquecimento ativo.....	72
5.2	Otimização do sistema pipe-in-pipe com aquecimento elétrico ativo.....	75
5.2.1	Dados do Polipropileno.....	75
5.2.1.1	<i>Método de otimização multi-objetivo o MOGT .....</i>	<i>75</i>
5.2.1.2	<i>Método de otimização multi-objetivos o MOSA.....</i>	<i>79</i>
5.2.1.3	<i>Método de otimização multi-objetivo o ARMOGA .....</i>	<i>82</i>
5.2.1.4	<i>Comparação entre os métodos de otimização.....</i>	<i>87</i>
5.2.2	Dados da Lã mineral .....	88
5.2.2.1	<i>Método de otimização multi-objetivo o MOGT .....</i>	<i>89</i>
5.2.2.2	<i>Método de otimização multi-objetivos o MOSA.....</i>	<i>93</i>
5.2.2.3	<i>Método de otimização multi-objetivo o ARMOGA .....</i>	<i>100</i>
5.2.2.4	<i>Comparação entre os métodos de otimização.....</i>	<i>108</i>
5.2.3	Dados do Polipropileno + Lã mineral .....	109
5.2.3.1	<i>Método de otimização multi-objetivo o MOGT .....</i>	<i>109</i>
5.2.3.2	<i>Método de otimização multi-objetivos o MOSA.....</i>	<i>113</i>
5.2.3.3	<i>Método de otimização multi-objetivo o ARMOGA .....</i>	<i>116</i>
5.2.3.4	<i>Comparação entre os métodos de otimização.....</i>	<i>119</i>
5.3. 4	Comparação entre os materiais isolantes .....	120
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>122</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>124</b>
<b>8</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>128</b>
8.1	ANEXO 01.....	129



## LISTA DE FIGURAS

FIG. 1.1	Geometria para estudo do air-gap.....	19
FIG. 2.1	Diagrama de fase e condições de formação de hidratos. ....	22
FIG. 2.2	Bloqueio de linha por deposição de parafina.....	23
FIG. 2.3	Sistema pipe-in-pipe.....	24
FIG. 2.4	Sistema pipe-in-pipe com aquecimento ativo.....	25
FIG. 3.1	Esquema de duto com duas camadas.....	34
FIG. 3.2	Esquema de duto multicamadas com aquecimento elétrico instalado na superfície do tubo interno.....	40
FIG. 3.3	Notação para a malha computacional utilizada na aproximação por diferenças finitas.....	44
FIG. 4.1	Exemplo que ilustra várias opções de compra de casa.....	50
FIG. 4.2	Descrição esquemática do método simplex.....	54
FIG. 4.3	Algoritmo Nash-Simplex.....	55
FIG. 4.4	A probabilidade de aceitação em regras de aceitação multi-objetivo.....	57
FIG. 4.5	Fluxograma do ARMOGA.....	59
FIG. 4.6	Programação no ModeFRONTIER®.....	63
FIG. 5.1	Comparação da solução analítica e numérica para um tubo composto por duas camadas no tempo igual a 1 (uma) hora.....	66
FIG. 5.2	Comparação da solução analítica e numérica para um tubo composto por duas camadas no tempo igual a 3 (três) horas.....	66
FIG. 5.3	Comparação da solução analítica e numérica para um tubo composto por duas camadas no tempo igual a 6 (seis) hora.....	67
FIG. 5.4	Comparação da solução analítica e numérica para um tubo composto por duas camadas no tempo igual a 8 (oito) horas.....	67
FIG. 5.5	Comparação da solução numérica 1D e numérica 2D para um tubo composto por cinco camadas no tempo igual a 1 (uma) hora.....	70
FIG. 5.6	Comparação da solução numérica 1D e numérica 2D para um tubo composto por cinco camadas no tempo igual a 3 (três) horas.....	70
FIG. 5.7	Comparação da solução numérica 1D e numérica 2D para um tubo composto por cinco camadas no tempo igual a 6 hora.....	71
FIG. 5.8	Comparação da solução numérica 1D e numérica 2D para um tubo	

	composto por cinco camadas no tempo igual a 8 hora.....	71
FIG. 5.9	Pipe-in-pipe sem aquecimento ativo.....	72
FIG. 5.10	Comparação entre a solução analítica com a solução numérica para um tubo com N camadas com aquecimento ativo elétrico.....	74
FIG. 5.11	Pipe-in-pipe com aquecimento ativo em um tempo de 1 (uma) hora.....	74
FIG. 5.12	Matriz de correlação entre as variáveis que foram utilizadas na otimização feita pelo MOGT utilizando o polipropileno como material isolante.....	79
FIG. 5.13	Matriz de correlação entre as variáveis que foram utilizadas na otimização feita pelo MOSA utilizando o polipropileno como material isolante.....	82
FIG. 5.14	Matriz de correlação entre as variáveis que foram utilizadas na otimização feita pelo ARMOGA utilizando o polipropileno como material isolante.....	86
FIG. 5.15	Comparação entre os métodos de Otimização utilizando o polipropileno.....	87
FIG. 5.16	Matriz de correlação entre as variáveis que foram utilizadas na otimização feita pelo MOGT utilizando a lã mineral como material isolante.....	93
FIG. 5.17	Matriz de correlação entre as variáveis que foram utilizadas na otimização feita pelo MOSA utilizando a lã mineral como material isolante.....	100
FIG. 5.18	Matriz de correlação entre as variáveis que foram utilizadas na otimização feita pelo ARMOGA utilizando a lã mineral como material isolante.....	107
FIG. 5.19	Comparação entre os métodos de Otimização utilizando a lã mineral.....	109
FIG. 5.20	Matriz de correlação entre as variáveis que foram utilizadas na otimização feita pelo MOGT utilizando o polipropileno+lã mineral como material isolante.....	113
FIG. 5.21	Matriz de correlação entre as variáveis que foram utilizadas na otimização feita pelo MOSA utilizando o polipropileno+lã mineral como material isolante.....	115
FIG. 5.22	Matriz de correlação entre as variáveis que foram utilizadas na otimização feita pelo ARMOGA utilizando o polipropileno+lã mineral como material isolante.....	118
FIG. 5.23	Comparação entre os métodos de Otimização.....	119
FIG. 5.24	Análise entre os métodos materiais isolantes utilizando o MOGT.....	120
FIG. 5.25	Análise entre os métodos materiais isolantes utilizando o MOSA.....	121
FIG. 5.26	Análise entre os métodos materiais isolantes utilizando o ARMOGA.....	121

## LISTA DE TABELAS

TAB. 5.1	Tabelas convergência do tempo e da malha do tubo com duas camadas .....	68
TAB. 5.2	Propriedades geométricas do Pipe-in-Pipe.....	69
TAB. 5.3	Propriedades termofísicas do Pipe-in-Pipe.....	69
TAB. 5.4	Variáveis otimizadas pelo MOGT utilizando o polipropileno como material isolante.....	76
TAB. 5.5	Objetivos encontrados pelo MOGT utilizando o polipropileno como material isolante.....	77
TAB. 5.6	Variáveis otimizadas pelo MOSA utilizando o polipropileno como material isolante.....	80
TAB. 5.7	Objetivos encontrados pelo MOSA utilizando o polipropileno como material isolante.....	81
TAB. 5.8	Variáveis otimizadas pelo ARMOGA utilizando o polipropileno como material isolante.....	83
TAB. 5.9	Objetivos encontrados pelo ARMOGA utilizando o polipropileno como material isolante.....	84
TAB. 5.10	Comparação entre as superfícies de respostas utilizando o MOGT.....	88
TAB. 5.11	Variáveis otimizadas pelo MOGT utilizando a lã mineral como material isolante.....	90
TAB. 5.12	Objetivos encontrados pelo MOGT utilizando a lã mineral como material isolante.....	91
TAB. 5.13	Variáveis otimizadas pelo MOSA utilizando a lã mineral como material isolante.....	94
TAB. 5.14	Objetivos encontrados pelo MOSA utilizando a lã mineral como material isolante.....	97
TAB. 5.15	Variáveis otimizadas pelo ARMOGA utilizando a lã mineral como material isolante.....	101
TAB. 5.16	Objetivos encontrados pelo ARMOGA utilizando a lã mineral como material isolante.....	104
TAB. 5.17	Variáveis otimizadas pelo MOGT utilizando o polipropileno+lã mineral como material isolante.....	110
TAB. 5.18	Objetivos encontrados pelo MOGT utilizando o polipropileno+lã mineral	

	como material isolante.....	112
TAB. 5.19	Variáveis otimizadas pelo MOSA utilizando o polipropileno+lã mineral como material isolante.....	114
TAB. 5.20	Objetivos encontrados pelo MOSA utilizando o polipropileno+lã mineral como material isolante.....	115
TAB. 5.21	Variáveis otimizadas pelo ARMOGA utilizando o polipropileno+lã mineral como material isolante.....	116
TAB. 5.22	Objetivos encontrados pelo ARMOGA utilizando o polipropileno+lã mineral como material isolante.....	117

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

### ABREVIATURAS

ARMOGA	-	Adaptive Range Multi –Objective Genetic Algorithm
RBF	-	Funções de Base Radial
CI	-	Custo de Instalação
CO	-	Custo de Operação
Esp	-	Espessura da camada isolante
Espl	-	Espessura da camada isolante
GP	-	Processo Gaussiano
NN	-	Redes Neurais
MOGT	-	Multi Objective Game Theory
MOSA	-	Muti Objective Simulated Annealing
PIP	-	Pipe-in-Pipe
RSM	-	Metodologia da Superfície de Resposta
SVD	-	Singular Value Decomposition
Tmin	-	Temperatura Mínima
Maxt	-	Minimização de um sobre temperatura
minCICO	-	A soma dos custos de Instalação e do custo de operação

### SÍMBOLOS

<b>a</b>	-	Raio do tubo interno
<b>b</b>	-	Raio do tubo externo
$f_1$	-	Temperatura inicial da primeira camada do duto
$f_2$	-	Temperatura inicial da segunda camada do duto
$g_1$	-	Potência do primeiro aquecedor
$g_2$	-	Potência do segundo aquecedor
$g_3$	-	Potência do terceiro aquecedor
$g_4$	-	Potência do quarto aquecedor
$g_5$	-	Potência do quinto aquecedor
<b>h</b>	-	Coefficiente de transferência de calor por convecção

Adimensionalizado

H	-	Coefficiente de transferência de calor por convecção
$k$	-	Condutividade térmica
$K_{ad}$	-	Nova variável
$k_{ii}$	-	Condutividade térmica
$k_b$	-	Constante de Boltzmann
$r$	-	Coordenada radial
$t_1$	-	Ângulos do primeiro aquecedor
$t_2$	-	Ângulos do segundo aquecedor
$t_3$	-	Ângulos do terceiro aquecedor
$t_4$	-	Ângulos do quarto aquecedor
$t_5$	-	Ângulos do quinto aquecedor
$T_\infty$	-	Temperatura do ambiente
$\bar{T}$	-	A transformada integral em relação à variável $\phi$
$\tilde{T}$	-	A transformada integral em relação à variável $r$
$t$	-	Tempo

## SÍMBOLOS GREGOS

$\alpha_{ii}$	-	Difusividade térmica
$\beta_n$	-	Autovalores
$\phi(r)$	-	Função de $r$
$\phi$	-	Coordenada radial
$\phi_1$	-	Ângulos do primeiro aquecedor
$\phi_2$	-	Ângulos do segundo aquecedor
$\phi_3$	-	Ângulos do terceiro aquecedor
$\phi_4$	-	Ângulos do quarto aquecedor
$\phi_5$	-	Ângulos do quinto aquecedor
$\varphi$	-	Coordenada radial
$\psi_{1n}(r)$	-	Autofunções

$\psi_{2n}(r)$	-	Autofunções
$g(\varphi)$	-	Geração de calor
$J_0$	-	Função de Bessel do segundo tipo e ordem zero
$N(\nu)$	-	Norma
$\ddot{O}(\nu, \phi)$	-	Autofunções
$N(\beta_m)$	-	Norma
$R_\nu(\beta_m, r)$	-	Autofunções
$\Gamma(t)$	-	Função de t
$\bar{\theta}(r, \phi, t)$	-	A transformada integral em relação à variável $\phi$
$\approx \theta(r, \nu, t)$	-	A transformada integral em relação à variável $\mathbf{r}$
$\nu$	-	Autovalor
$\frac{\partial}{\partial r}$	-	Derivada parcial em relação à coordenada $r$
$T(r, \phi, t)$	-	Temperatura aproximada

## SUBSCRITO

i	-	Subscrito contador de frequências em $\mathbf{r}$
ii	-	Número de camadas
j	-	Subscrito contador de frequências em $\phi$
m	-	Número de autovalores
n	-	Número de autovalores

## SOBRESCRITO

$p$	-	Sobrescrito contador de frequências em $\mathbf{t}$
-----	---	---

## RESUMO

A transferência de calor em dutos com aquecimento ativo tem sido estudada intensamente devido às novas aplicações na produção de óleo e gás natural em águas profundas, no intuito de atender às necessidades impostas pela garantia do escoamento nestas condições. Neste trabalho, primeiramente, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o sistema Pipe-in-pipe, enfatizando a necessidade do aquecimento ativo das tubulações de produção a fim de evitar a formação de hidratos de gás e a deposição de parafinas. Em seguida, é desenvolvido um estudo analítico-numérico de transferência de calor em coordenadas cilíndricas com geração de calor, tendo em vista as suas aplicações na produção de petróleo e gás natural em águas profundas, no caso mais crítico, sob o ponto de vista da formação de hidratos, ou seja, em uma parada de produção. Posteriormente, é feita otimização do sistema pipe-in-pipe, em que será otimizada a espessura da camada isolante, a posição e a potência dos aquecedores elétricos, com o objetivo de maximizar a temperatura mínima do óleo durante a parada de produção. Para essa tarefa, três métodos de otimização multi-objetivos foram utilizados, providos pelo software modeFrontier®. Por fim, será apresentada a programação feita no software modeFrontier®.



## ABSTRACT

Heat transfer in ducts with active heating at the wall has been intensively studied, due to new applications in oil and natural gas production in deep water. This type of system is used in situations where there is a need to guarantee the flow for submarine production of oil and natural gas. In this work, a literature review on the Pipe-in-pipe system, with emphasis on the necessity of active heating of the pipelines to avoid gas hydrate formation and wax deposition. Soon afterwards, a hybrid analytical-numerical study of transfer of heat is developed in cylindrical coordinates with generation of heat, tends in view their applications in the production of oil and natural gas in deep waters, and in was considered the most critical situation, where the flow was stopped for a long maintenance period. Later, it is made optimization of the pipe-in-pipe system, where the thickness of the insulating layer, the position and the intensity of the electrical resistances were optimized in order to minimize the operational and installation costs and to maximize the temperature of the oil, preventing gas hydrate formation and wax deposition. For that task, three multi-objective optimization methods were used, provided by the software modeFrontier®. Finally, the programming will be presented done in the software modeFrontier®.

# CAPÍTULO 1

## 1 INTRODUÇÃO

A transferência de calor em dutos com aquecimento ativo tem sido estudada intensamente, devido às novas aplicações na produção de óleo e gás natural em águas profundas, visando atender às necessidades impostas pela garantia do escoamento nestas condições.

A determinação do campo de temperaturas de um fluido viscoso no escoamento em tubos circulares é de fundamental importância na prevenção da formação de hidratos e da deposição de parafina em tubulações de petróleo e gás natural, que reduzem sensivelmente o escoamento, podendo bloquear por completo a passagem do produto, reduzindo a produtividade.

A **Parafina** é uma substância que ocorre naturalmente na maioria dos óleos crus e, dependendo das suas características, pode ser problemática. A parafina se deposita e tende a reter água, areia e petróleo, formando depósitos de consistência e dureza, obstruindo a seção do oleoduto.

**Hidratos** são sólidos cristalizados com aparência semelhante ao gelo, formados por moléculas de gás natural, gás sulfídrico ou dióxido de carbono em contato com água em baixas temperaturas e altas pressões. Possuem densidade maior que a do petróleo e tendem a acumular-se nas irregularidades das tubulações, formando obstruções.

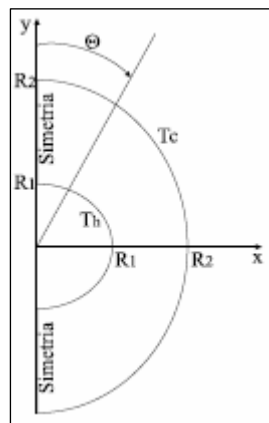
Ultimamente, os sistemas Pipe-in-Pipe (PIP) têm sido propostos como uma solução viável para atender às exigências da garantia do fluxo da produção do óleo e do gás em águas profundas. Esse sistema é formado por duas tubulações concêntricas de metal, onde o espaço entre eles é preenchido por uma ou mais camadas de materiais isolantes, como a lã mineral ou o polipropileno, que por serem de baixa densidade, se prestam muito bem à finalidade de manter o isolamento térmico necessário para a exploração de petróleo e gás em águas profundas, sem a formação de hidratos e parafinas.

A finalidade do PIP com aquecimento elétrico ativo é a de retardar suficientemente o resfriamento do fluido em paradas de produção, impedindo a formação de hidratos e parafinas, bem como permitir o reaquecimento da linha para reinício do bombeamento, após uma parada de produção acidental ou para manutenção.

O estudo da transferência de calor transiente em dutos é de fundamental importância para prever o campo de temperaturas do sistema de produção. O caso mais crítico, sob o ponto de vista da formação de hidratos, seria a situação em que o óleo estaria parado sujeito ao resfriamento externo por convecção devido às correntes submarinas, que tipicamente apresentam temperatura média de  $4^{\circ}\text{C}$ .

Partindo de uma condição inicial para a temperatura do óleo no interior do tubo interno e para as diversas camadas com diferentes condutividades térmicas, além da condição contorno para a superfície do tubo externo, tem-se um problema de condução de calor com várias camadas, onde o óleo será considerado como uma dessas camadas para formulação do problema. Como o óleo apresenta um alto número de Prandtl e uma diferença relativamente pequena de temperatura, pode-se desprezar a convecção natural interna.

Em dutos com múltiplas camadas existe geralmente um air-gap. Esse air-gap é uma camada de ar situado, entre a última camada de isolante e o tubo externo, como mostra a figura 2.1



**FIG. 2.1** Geometria para estudo do air-gap

Observa-se que o ar na geometria acima estaria contido entre os raios  $R1$  e  $R2$ , e estaria sujeito ao fenômeno de convecção natural, devido à diferença de temperatura ( $Th-Tc$ ) e à variação da densidade do ar com a temperatura. Nesse trabalho, o air-gap foi desprezado. Logo, a influência da convecção natural no air-gap não foi levada em consideração, tornando as soluções conservativas.

Com esta formulação, uma vez definidos os diâmetros do tubo interno e das camadas de aço e considerando o aquecimento elétrico na parede do tubo interno, tem-se a espessura das

camadas isolantes que serão livres para serem escolhidas, juntamente com a posição dos aquecedores elétricos.

Portanto, este trabalho tem por objetivo otimizar a espessura da camada isolante e a posição e a intensidade dos aquecedores elétricos, visando manter temperatura do óleo acima de 30°C, durante a parada de produção. Além disso, esse processo de otimização permite reduzir o custo envolvendo o emprego dos materiais isolantes e o custo de operação dos aquecedores elétricos, de forma que a temperatura dentro do tubo interno se situe acima da temperatura de formação dos hidratos no período de oito horas, sendo utilizados os métodos de otimização Multi Objective Game Theory (MOGT), Muti Objective Simulated Annealing (MOSA) e Adaptive Range Muti-Objective Genetic Algorithm (ARMOGA) provido pelo software modeFrontier®.

No capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica da literatura disponível a respeito dos temas relativos aos sistemas pipe-in-pipe, ao problema de condução de calor multicamadas e os trabalhos relacionados aos métodos de otimização.

O capítulo 3 descreve o problema físico e a formulação matemática para o problema de condução de calor, além dos métodos analíticos e numéricos utilizados na solução do problema de transferência de calor, empregadas no software modeFrontier®, para a otimização do problema.

No capítulo 4, será introduzida a noção de otimização mono-objetivo e multi-objetivo, juntamente com a fronteira de Pareto. Serão apresentados também os três métodos de otimização e as superfícies de respostas empregadas nesse trabalho. Além disso, o algoritmo computacional referente à implementação no software modeFrontier® será discutido neste capítulo.

Posteriormente, no capítulo 5, são apresentados os resultados e discussões, juntamente com a validação do problema de condução de calor.

Serão apresentadas, no capítulo 6, as conclusões e sugestões para continuidade deste trabalho.

## **CAPÍTULO 2**

### **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo, será realizada uma revisão bibliográfica sobre o sistema Pipe-in-pipe (PIP), focalizando os problemas encontrados e os aspectos do aquecimento ativo das linhas de produção de petróleo e gás natural em águas profundas. Posteriormente, será feita uma análise dos presentes trabalhos na literatura sobre otimização do sistema pipe-in-pipe.

#### **2.1 SISTEMA PIPE-IN-PIPE**

Com as instalações de explorações de petróleo em águas cada vez mais profundas, novos desafios tecnológicos necessitam ser superados, dentre os quais se destacam o problema da pressão hidrostática elevada e a baixa temperatura do mar (4°C). A garantia do escoamento do fluido sem interrupções ou perturbações na linha de produção é ponto vital na exploração de óleo e gás natural em águas profundas. Ultimamente é da garantia de escoamento que vem a maior demanda para análises de escoamentos transientes.

A parada de produção e fechamento de válvulas de segurança são eventos que promovem perturbações em um sistema de escoamento de petróleo. Após esta parada, a situação dos fluidos contidos na linha de produção torna-se crítico. Nesta situação, o fluido fica confinado na linha entre duas válvulas e, devido à baixa temperatura ambiente uma parada de produção por um longo tempo pode levar os fluidos contidos na linha a uma condição de temperatura baixa. Diversos problemas podem surgir quando baixas temperaturas são atingidas, dentre eles o problema de formação de hidratos e o de deposição de parafinas. Estes problemas são graves, pois podem levar à interrupção de produção com grandes prejuízos financeiros. Portanto, é de extrema importância determinar o tempo para tomar alguma ação após uma parada de produção, em uma condição desfavorável.

A formação de hidratos em linhas e equipamentos de produção pode gerar uma variedade de problemas tais como: o aumento da potência de bombeamento, redução da vazão ou até

mesmo o bloqueio total da linha, com perda da produção e do equipamento instalado. Os problemas em operações de produção têm sido associados, principalmente, com sistemas de gás úmido onde as condições de formação de hidratos são favoráveis. Os hidratos tradicionalmente não têm sido considerados como um problema para sistemas de óleo cru, pois, normalmente, antes do processamento, estes escoam relativamente quentes, e após o processamento, o transporte é realizado com o gás e a água separados do óleo.

A formação de hidratos pode causar grandes danos, caso não possam ser evitados por injeção de inibidores, aquecimento, despressurização ou outros métodos (BOATMAN E PETERSON, 2000). A condição de formação de hidratos pode ser especificada na figura 2.1.

Observando a figura, tem-se uma condição de produção do petróleo a cerca de 60°C e a pressão de 300 bars, estando bem longe da zona de formação dos hidratos, mas, durante uma parada longa e supondo que não há aquecimento ativo, a temperatura do óleo tenderá à temperatura da água do mar, em que está localizada dentro da área de formação dos hidratos.

Recentemente, MORKHATAB S. ET AL., (2007) apresentaram um trabalho referente à produção de gás natural em águas profundas, os riscos, a segurança e a economia devido à formação de hidratos. Naquele trabalho, a compreensão de como, quando e onde podem aparecer os hidratos, foram discutidas e analisadas para prevenir a formação de hidratos.

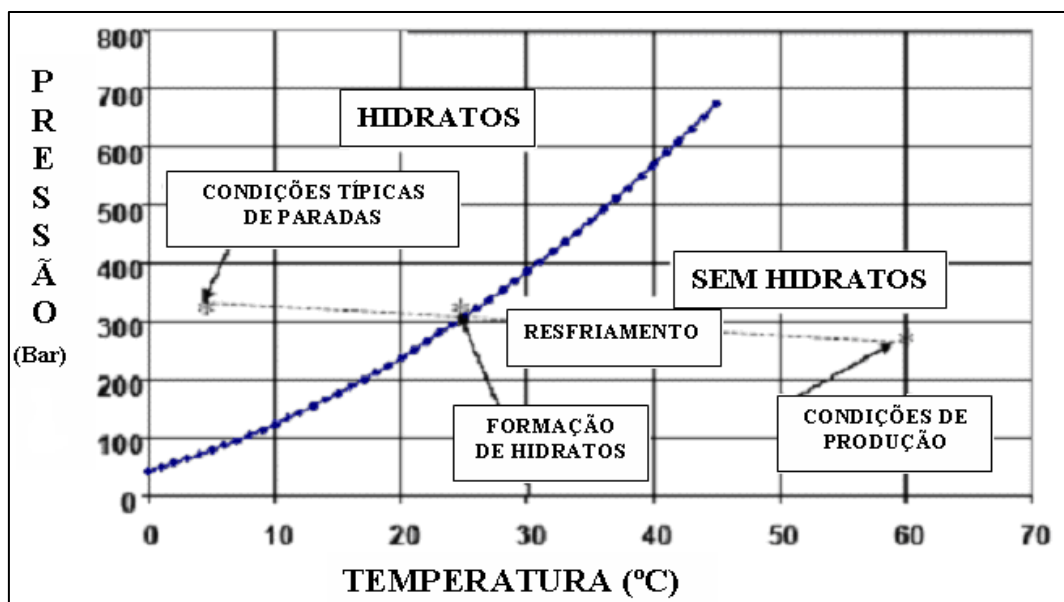


FIG. 2.1 Diagrama de fase e condições de formação de hidratos.

Outro problema operacional crítico enfrentado pela indústria do petróleo em águas profundas é a deposição de parafinas no interior dos dutos de produção e de transporte.

A *Parafina* é uma substância que ocorre naturalmente na maioria dos óleos crus, podendo ser problemática, pois se depositada, tende a reter água, areia e petróleo, formando depósitos de consistência, dureza e densidades variáveis, que obstruem a seção do tubo. Estes podem ser limpos por solventes, detergentes ou dispersantes (CREEK J.L. ET AL., 1999).

Fazendo referência à figura 2.1: em uma produção cujo petróleo flui do reservatório a tipicamente 60 °C para as linhas de produção que o transportam para a plataforma e da plataforma para a costa em elevadas profundidades, onde a temperatura do oceano é da ordem de aproximadamente 4 °C, existe uma troca de calor por convecção. A solubilidade da parafina no petróleo é uma função decrescente da temperatura. Enquanto o petróleo flui, ele perde calor para a água circundante. Se certa temperatura crítica for atingida, a parafina pode precipitar-se da solução e depositar-se ao longo das paredes internas do duto, como mostrado na Figura 2.2.



**FIG. 2.2** Bloqueio de linha por deposição de parafina.

TEIXEIRA, A. (2004) apresentou um cuidadoso trabalho experimental de visualização da formação de depósitos de parafina, em condições controladas por laboratórios, na qual o fluido apresentava uma quantidade definida de parafinas. Os experimentos foram apresentados para resfriamento do fluido parado e em movimento.

Alguns outros problemas encontrados pela indústria de petróleo, foram: a condensação de líquido em tubulações com gás úmido, aumento substancial da viscosidade com diminuição da temperatura, acarretando graves problemas para reiniciar o bombeio devido ao aumento proibitivo da uma potência de bombeamento, e ainda problemas de abertura da coluna devido a baixas temperaturas.

As razões para esses problemas são diretamente proporcionais à razão de perda de calor do fluido. O isolamento pode, portanto, reduzir os problemas, mas não evitá-los completamente. Durante uma parada longa da linha de produção, os fluidos resfriarão até a temperatura ambiente, mas o isolamento estenderá o período de resfriamento evitando problemas na partida da linha associados com fluidos gelados ou muito viscosos.

O controle das perdas de calor isolando o duto é geralmente a melhor opção para prevenir a formação de hidratos e parafinas, mantendo o fluido escoando acima da temperatura de formação destes.

Os sistemas Pipe-in-pipe têm por objetivo garantir o isolamento térmico e a integridade estrutural necessária para a exploração de petróleo e gás natural em águas profundas, sem a formação de hidratos e a deposição de parafinas. É de interesse particular a análise da situação transiente em paradas de produção.

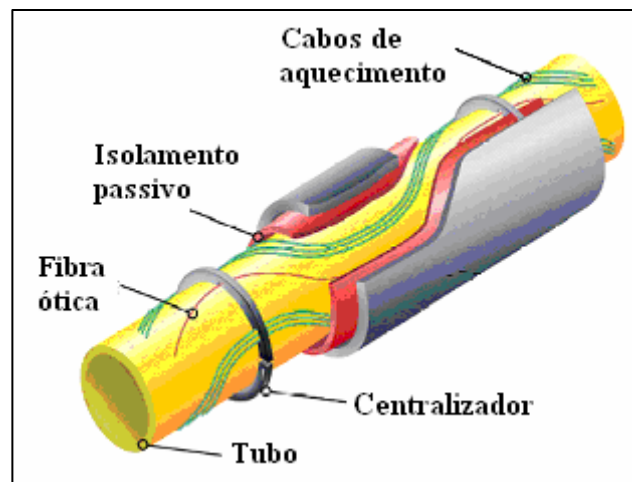
O *Pipe-in-Pipe*, ilustrado na figura 2.3 apresenta uma estrutura do tipo sanduíche é devidamente projetada para atender aos requisitos de resistência, flexibilidade e isolamento térmico, podendo representar uma opção atrativa a ser empregada em dutos submarinos e *risers* para aplicações em águas profundas (MOLLISON, M. I., 1992).



**FIG. 2.3** Sistema pipe-in-pipe.



O sistema pipe-in-pipe com aquecimento elétrico ativo é um método desenvolvido para diminuir as perdas de calor em um duto aquecendo a linha de produção, pois mesmo para uma linha de produção multifásica com um suposto isolamento perfeito, existe o risco de formação de hidratos devido à despressurização e conseqüente resfriamento do gás, podendo, então, utilizar uma combinação de um isolamento passivo com aquecimento por meio de cabos elétricos, colocados na superfície externa do tubo interno, em meio do isolamento térmico, como ilustrado na figura 2.4 (GOMES ET AL., 1996).



**FIG. 2.4** Sistema pipe-in-pipe com aquecimento ativo.

A simulação do aquecimento do sistema pipe-in-pipe em poços de petróleo, em situação de parada de produção, naturalmente leva aos fundamentos de condução de calor através das paredes da tubulação e do isolamento térmico, e da convecção térmica com a corrente da água do mar externa ao tubo, com um escoamento transiente ou permanente. Uma análise da transferência de calor na linha de transporte composta é necessária para a previsão da evolução da temperatura em toda a linha de transporte (SU, 2003, SU e CERQUEIRA, 2001, SU e ESTEFEN, 2005, SU et AL., 2002).

SU e ESTEFEN (2001) desenvolveram um modelo analítico para o problema de condução de calor transiente em tubulações compostas por multicamadas, durante o aquecimento da linha de produção e a desativação da produção. Eles utilizaram uma formulação local de condução unidimensional em paredes múltiplas, propondo um procedimento de parâmetros concentrados melhorados a partir das idéias na técnica das Equações Integrais Acopladas para a obtenção da variação da temperatura dentro de cada subcamada. A equação da energia para

o fluido escoando, ao longo do tubo, foi resolvida numericamente pelo método explícito de diferenças finitas. O sistema pipe-in-pipe considerado foi formado por dois tubos de aço com seu espaço interno preenchido por polipropileno.

Neste mesmo ano, DENNIEL e LAOUIR (2001) descreveram um projeto de pipe-in-pipe com aquecimento ativo contínuo para grandes profundidades. A técnica de aquecimento ativo aparece como um método atrativo para a manutenção da temperatura da linha de produção submersa acima de um limite crítico, geralmente entre 20 a 40°C. Um protótipo é proposto pelos autores para testes. Este protótipo consiste em um tubo de aço com cabos de aquecimento por corrente alternada instalados na superfície externa. Sistemas de monitoramento da temperatura por fibras óticas também são instalados, junto à parede externa do tubo. Uma camada de material isolante e centralizadores são adicionados ao sistema que é recoberto por outro tubo de aço. O aquecimento é gerado por três grupos de três cabos, dispostos axialmente no tubo em uma configuração “S” para uniformizar a distribuição de energia térmica ao tubo interno. Cada grupo consiste em uma conexão trifásica em estrela, podendo proporcionar aproximadamente 100 W/m para uma voltagem entre relativamente baixa (345 V) em uma distância de 3 km. O sistema de monitoramento da temperatura por fibras óticas baseia-se no fato de que as propriedades das fibras óticas dependem da temperatura. Este sistema consegue determinar o perfil de temperatura com uma resolução de 3 m. Dois protótipos semelhantes foram construídos para testes, com o objetivo de analisar a influência da presença dos cabos de aquecimento e fibras óticas no coeficiente global de transferência de calor. A única diferença entre os dois é que o segundo protótipo não possuía o aquecimento elétrico e fibras óticas. O primeiro teste foi realizado sem aquecimento ativo e com aquecimento ativo desligado para o Pipe-in-Pipe. O resultado mostra que a presença dos cabos não afetou significativamente o isolamento passivo do sistema. Logo em seguida, foi realizado novo teste para medir a eficiência do sistema de aquecimento ativo. Dois tipos de materiais isolantes foram utilizados: a lã mineral e painéis microporosos. Os resultados encontrados mostraram que a eficiência foi de 80%. Os outros 20% foram perdidos dentro do sistema isolante. A eficiência do sistema de aquecimento ativo foi definida como a razão entre a energia térmica transferida para o fluido e a potência elétrica fornecida ao sistema de aquecimento. Esse sistema proposto pelos autores foi empregado para transporte de petróleo entre a “árvore de natal”, situada a 2500 m e o terminal do *rise*, localizado a uma profundidade de 1500 m e a uma distância de 20 km, utilizando um tubo com oito polegadas, em que a temperatura de produção é de 50°C. É necessário manter a temperatura de transporte

do fluido acima de 30°C para evitar a formação de hidratos e a deposição de parafinas. (DENNIEL e LAOUIR 2001) mostraram uma simulação de resfriamento, em que a diferença de temperatura de 30°C a 35°C do óleo e o ambiente externo podia ser mantida com uma potência térmica linear de 20 a 40 W/m. Com potências menores podem estender o tempo de resfriamento. Os autores também apontaram que, para um sistema pipe-in-pipe bem isolado, o aquecimento se daria em pequenos intervalos de tempo, para potências lineares da ordem de 100 W/m.

SU ET AL., (2002) apresentaram a teoria de aquecimento segmentado do tubo. Eles analisaram a transferência de calor em tubulações de multicamadas, com aquecimento ativo em regime permanente através de balanço global de energia. Eles utilizaram dois métodos de aquecimento ativo. O primeiro, através de água quente circulando pela tubulação e o segundo, através de resistências elétricas instaladas na superfície externa do tubo mais interno. Com o uso combinado do isolamento térmico passivo com o aquecimento ativo, foi possível otimizar o aquecimento, reduzindo o consumo de energia elétrica em comparação com a situação em que toda a tubulação é aquecida. Nesse trabalho, apenas a parte final da tubulação foi aquecida, especificando um limite mínimo para a temperatura de 30°C.

KULLMANN D. H., (2006) desenvolveu um estudo analítico-numérico de transferência de calor em dutos com aquecimento ativo na parede. Especificamente, foi proposto um sistema para otimizar o aquecimento elétrico segmentado para minimizar a demanda energética de aquecimento das linhas de transporte de petróleo e gás. Ela propôs um sistema similar ao apresentado por DENNIEL e LAOUIR (2001), em conjunto com a teoria de aquecimento segmentado do tubo de escoamento, proposto por SU ET AL. (2002). Esse sistema tem a função de fornecer uma ferramenta que controla a troca de calor entre o fluido de produção e o ambiente de águas profundas. A energia requerida é produzida pelo aquecimento resistivo dos cabos de aquecimento contínuo quando ativados eletricamente. A tensão do sistema elétrico é variável, sendo controlada e monitorada pela plataforma. Ela apresentou um modelo de aquecimento por partes, parecido com o proposto por SU ET AL. (2002). Esse modelo apresentou um sistema de aberturas e fechamentos de chaves de contato elétrico automáticas, comandadas através de um quadro de comando a ser instalado na plataforma.

Uma análise em regime permanente foi realizada por SU ET AL. (2003) para investigar o aquecimento elétrico ativo de tubulações sanduíches. O balanço global relaciona a evolução da temperatura do fluido ao longo da tubulação, introduzindo tiras de resistências elétricas, similares ao apresentado por DENNIEL e LAOUIR (2001). SU ET AL. (2003) apresentaram

um modelo local bidimensional construído para obter o campo de temperatura na parede interna da tubulação, em uma seção transversal típica. As equações diferenciais parciais foram resolvidas pelo método numérico de volumes finitos. Em seguida, SU ET AL. (2003) mostraram que, com uma fonte de alimentação de 0,3 V/m e, com quatro tiras de cobre com 1 mm de espessura e uma largura de 4 mm, obtém distribuição aceitável de temperatura do escoamento. Por fim, mostraram que as linhas de transporte compostas de multicamadas com aquecimento ativo são boas soluções para garantia do escoamento de óleo e gás em águas profundas.

SU ET AL. (2005) apresentaram uma análise da transferência de calor transiente nas linhas de transportes compostas por multicamadas com aquecimento elétrico ativo, utilizando o polipropileno como material isolante, em uma simulação numérica. Os resultados indicaram que o isolamento passivo é necessário para condições do estado permanente de produção. Mesmo assim, o aquecimento esteve sempre sendo acionado durante a parada de produção. Por fim, concluíram que a demanda de potência elétrica de aquecimento por unidade de comprimento era menor se a camada isolante fosse mais espessa.

TOUGHT ET. AL (2001) relataram uma experiência na utilização do pipe-in-pipe na exploração do campo Nile, localizado a 85 milhas ao Sul de Nova Orleans. Tubos PIP de 6'' x 10'' foram usados na ligação de 7,5 km entre os poços e risers, a uma profundidade de quase 1 km. Dutos de PIP foram utilizados devido à necessidade de alto isolamento térmico. Três tipos de materiais isolantes foram empregados: a espuma de poliuretano (PUF), lã mineral e isolamento microporoso. Analisando cada material, foi visto que para a lã mineral foi necessária uma espessura maior e a utilização do tubo externo (carrier) com 10 polegadas não era viável; um tubo com 12 polegadas aumentaria o custo do projeto. Para PUF foram utilizadas duas densidades. PUF de alta densidade ( $85 \text{ kg/m}^3$ ) requeria que todo o espaço anular do tubo fosse preenchido pelo material isolante, eliminando o airgap, gerando uma limitação no processo de fabricação. Como, o airgap é necessário, o PUF de alta densidade não foi utilizado no projeto. O isolamento de microporosos e o PUF de baixa densidade ( $48 \text{ kg/m}^3$ ) poderiam ser adequados ao projeto, mas para o isolamento de microporoso de sílica foi usada uma espessura de 24 milímetros por causa da maior espessura do PUF, necessária para compensar a perda de calor pelos centralizadores. O material isolante utilizado foi fornecido em forma de painéis selados a vácuo. Esses painéis foram instalados em duas camadas, a fim de evitar os espaços, já que foi identificado um aumento de aproximadamente 20 % da perda de calor dos aquecedores, por causa desses espaços. O emprego dos

centralizadores tem como objetivo preservar o isolamento térmico quando o tubo interno já isolado é inserido dentro do tubo externo na fabricação do pipe-in-pipe. Os centralizadores também são importantes durante o enrolamento do pipe-in-pipe do tubo externo de instalação, pois são eles que transmitem o esforço de enrolamento do tubo externo para o tubo interno, e devem ter alta capacidade de compressão, para que o material isolante não seja danificado durante o enrolamento. Os centralizadores, normalmente, são fabricados com materiais com condutividade térmica dez vezes maiores do que a condutividade térmica do isolamento térmico.

HAUSNER, M., ELA T., (2002) descreveram o desenvolvimento de um sistema de isolamento térmico utilizando o polipropileno como material isolante para as tubulações de águas profundas. Foram apresentados alguns testes em relação aos materiais envolvidos e a descrição do sistema de instalação desse sistema instalado no Golfo do México.

ESAKLUL K. A., ET AL, (2003) descreveram os desafios enfrentados em um campo de produção a 17 milhas. Os autores utilizaram o sistema pipe-in-pipe com aquecimento ativo, como forma de superar esses obstáculos. Eles demonstram as vantagens do aquecimento ativo em relação às opções químicas para o controle de formação de hidratos e a deposição de parafinas nas tubulações.

URDAHL ET. AL (2003) apresentaram um sistema de aquecimento elétrico direto (DEH) bem sucedido para a produção de gás para prevenir a formação de hidratos, no transporte do gás natural do campo de Huldra para a plataforma de Veslefrikk, durante as paradas de produção planejadas e não planejadas. URDAHL ET. AL (2003) utilizaram para a tubulação de gás injeção contínua de inibidores MEG (Módulo Eletrônico de Gerenciamento). Esse estudo foi realizado durante cinco meses. Aplicando o DEH a temperatura foi mantida acima da temperatura de formação dos hidratos. E mostrou muito eficiente em relação ao controle da temperatura aplicado sobre o gasoduto de Hidra, onde esse gasoduto era de aproximadamente 16 km de comprimento. Para o transporte do gás de uma plataforma a outra, foi utilizada, uma tubulação de oito polegadas, com uma espessura de onze milímetros e cinquenta milímetros de polipropileno para a camada isolante para a seção principal do tubo. Já na parte final, foi utilizado setenta e cinco milímetros de polipropileno, porque a profundidade é de 125 m no Huldra e crescente no sentido Veslefrikk (175 m). Esse sistema atendeu aos seguintes critérios:

- Manter a temperatura do fluido a 25°C durante as paradas de produção.

- Manter a temperatura de chegada a Veslefrikk acima dos 30°C, a fim de evitar a formação de parafina.

NUTTAL E ROGERS (1998) apresentaram um equipamento e a metodologia empregada para determinar a transição térmica de tubulações isoladas pelo sistema pipe-in-pipe. Esse experimento foi constituído com dois tubos de aço preenchidos com lã mineral ou microporoso. O experimento foi feito com ar como fluido tanto interno quanto externo, em convecção natural, em regime permanente na faixa de 50 a 200° C de temperatura do ar interior. NUTTAL E ROGERS (1998) encontraram um erro de  $\pm 4\%$  para a condutividade térmica dos materiais isolantes, enquanto os coeficientes de transferência de calor, interno e externo, apresentaram um erro de  $\pm 10\%$  e por fim, um erro de  $\pm 2\%$  para o coeficiente global de transferência de calor, sendo comparados os valores experimentais e estimados.

## 2.2 OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVO

De acordo com BLEUTER ET AL. (2003), os problemas de otimização complexos, podem ser achados em muitas áreas de aplicação. Um aspecto que contribui para a complexidade desses problemas compreende as características o espaço de busca, pois algoritmos exatos são frequentemente, não aplicáveis. Múltiplos objetivos formam outro tipo de dificuldades que métodos de otimização clássicos não foram projetados para tal. Assim, técnicas alternativas têm sido desenvolvidas ao longo do tempo como, por exemplo: Algoritmos Genéticos, Simulated Annealing e outras.

KEVIN I. ET AL (2007) Propôs um método de otimização de recozimento simulado multi-objetivo que elimina os problemas associados com compósito de funções objetivo. Também demonstra um método de escolha na perturbação, promovendo um aumento na pesquisa em toda a frente Pareto. Em seguida, é ilustrado o desempenho do novo método de otimização recozimento simulado multi-objetivo em vários testes, sendo comparado com NSGA II. Daí, concluíram que o novo método de otimização apresentou uma convergência mais rápida para frente de Pareto e com uma boa cobertura nas soluções encontradas em relação ao outro método de otimização.

FONSECA E FLEMING (1993) foram os primeiros a sugerir um MOGA que explicitamente enfatiza soluções não dominadas e ao mesmo tempo mantém a diversidade

entre elas. Na qual, ordena toda a população de acordo com diferentes classes de indivíduos não dominados. Inicialmente, o algoritmo encontra todos os indivíduos não dominados da população e insere-os na 1ª classe. Dos indivíduos remanescentes na população (número de indivíduos da população – número de indivíduos na 1ª classe), os não dominados são novamente selecionados, e inseridos na 2ª classe. Esse processo continua até que não existam mais indivíduos na população. Em seguida, os indivíduos, recebem um rank. Por exemplo: O rank 1 é o rank dos melhores indivíduos, ou seja, os indivíduos da 1ª classe. O rank dos outros indivíduos é atribuído de acordo com o número de soluções que dominam esse indivíduo, acrescido de um. Terminando esse processo de ordenação uma função de avaliação é atribuída a cada solução de acordo com seu rank, fazendo uma seleção para distribuir a população na fronteira de Pareto.

POLES S. (2003) Propôs um novo algoritmo genético multi-objetivo mais eficiente utilizando um novo operador de escolha que melhora a procura (pesquisa) das soluções. Este novo operador de escolha é capaz de preservar as soluções excelentes, evitando a convergência prematura das soluções evitando os mínimos locais. Vários testes foram realizados, mostrando que o novo algoritmo genético multi-objetivo é realmente mais eficiente e robusto para encontrar a fronteira de Pareto. E o novo operador de procura diminui o tempo de convergência das soluções não dominadas se compararmos com os outros algoritmos genéticos multi-objetivo.

RIGONI E. (2003) apresentou o método de otimização Recozimento Simulado multi-objetivo (MOSA): este método é um genuíno algoritmo de otimização multi-objetivo. A evolução do sistema é controlada por um parâmetro externo, a temperatura (T); inicialmente a configuração é submetida a uma perturbação randômica, que é controlado por parâmetros, em seguida, encontra-se uma variação de energia (E) entre o novo estado e o velho estado avaliados. Onde, em altas configurações quase todas as novas configurações são aceitas, mas em baixas temperaturas só as configurações favoráveis são aceitas. E é devidamente definido no conceito multi-objetivo, envolvendo a idéias de soluções de Pareto.

CLARICH A. ET AL. (2003) Propôs um novo algoritmo de otimização baseado na Teoria dos jogos, combinado um algoritmo de otimização determinístico mono-objetivo no caso o Simplex, que otimiza as funções objetivos, influenciando cada uma por uma divisão das melhores soluções obtidas no decorrer da otimização. No final encontra-se um ponto de equilíbrio, que seria o compromisso entre os objetivos competitivos. O método se baseia em análises estatísticas que adapta automaticamente a decomposição das variáveis entre os

jogadores no decorrer da otimização, conseqüentemente a estatística influencia cada variável para cada jogador. Esta adaptação gera uma melhor qualidade nos resultados obtidos na fronteira de Paretos. Nesse artigo foi feito vários testes, onde o algoritmo se mostrou muito robusto em todos os casos, em particular no caso de funções não lineares, se comparado com algoritmos multi-objetivo baseados em algoritmos genéticos.

HAUSNER E DIXON (2002) analisam um procedimento para o projeto de sistema pipe-in-pipe de uma forma julgada otimizada. Este procedimento foi denominado de inside-out e teve como base a otimização de cada camada do material isolante, a fim de reduzir suas espessuras, do tubo interno para o tubo externo.

Recentemente, SILVA E COLAÇO (2007) destacam a necessidade do aquecimento ativo das tubulações em uma parada longa. O método implícito das diferenças finitas foi usado na solução numérica das equações de condução de calor em coordenadas cilíndricas que governam o escoamento, junto com o problema de interfase entre as camadas de óleo, aço e materiais isolantes. Neste trabalho, SILVA E COLAÇO (2007), realizaram a otimização do Pipe-in-Pipe, utilizando o método da teoria dos jogos multi-objetivo (MOTG), onde foram otimizadas a espessura da camada isolante, a posição e a potência das resistências elétricas para minimizar os custos operacionais e de instalação e maximizar a temperatura do petróleo, evitando a formação de hidrato e a deposição de parafinas. Para esse trabalho, uma tubulação de seis polegadas com uma espessura de três milímetros para as camadas de aço, o material isolante escolhido foi o polipropileno e para a otimização foi utilizado o modeFrontier software®. Como resultado, foi obtida uma fronteira de Pareto para todas as soluções não dominadas, onde a decisão final pode ser feita considerando os cenários apropriados.



## CAPÍTULO 3

### 3 PROBLEMA DIRETO

Neste capítulo será apresentado o problema físico de condução de calor multicamadas em coordenadas cilíndricas com aquecimento ativo na parede, bem como a formulação matemática. Também serão apresentadas as hipóteses que levaram às condições de contorno e condição inicial apropriadas.

O problema físico estudado refere-se a um duto circular constituído de varias camadas. Dentre estas camadas, a mais interna representa um óleo parado e as subseqüentes são as espessuras do duto interno, a camada isolante e a espessura do duto externo. Esse sistema tem como objetivo retardar suficientemente o resfriamento do fluido proporcionado pela água do mar circunvizinha a tubulação em paradas de produção, impedindo a formação de hidratos e a deposição de parafinas nas tubulações de petróleo e gás natural, dentro de um período de tempo suficientemente longo.

Para a validação da solução por diferenças finitas pelo método implícito para o problema de condução de calor em multicamadas em coordenadas cilíndricas com aquecimento elétrico ativo é validado pelas soluções analíticas em duas etapas, abaixo descritas:

**Primeira etapa** – Para o problema de condução de calor em um tubo composto por duas camadas. Tem-se a validação da solução numérica proporcionada pela comparação com a solução analítica dada pelo método de separação de variáveis para o problema de condução de calor em um meio composto em uma dimensão, na qual a variação da temperatura é expressa somente em função da variação do raio ( $r$ ) e tempo ( $t$ ).

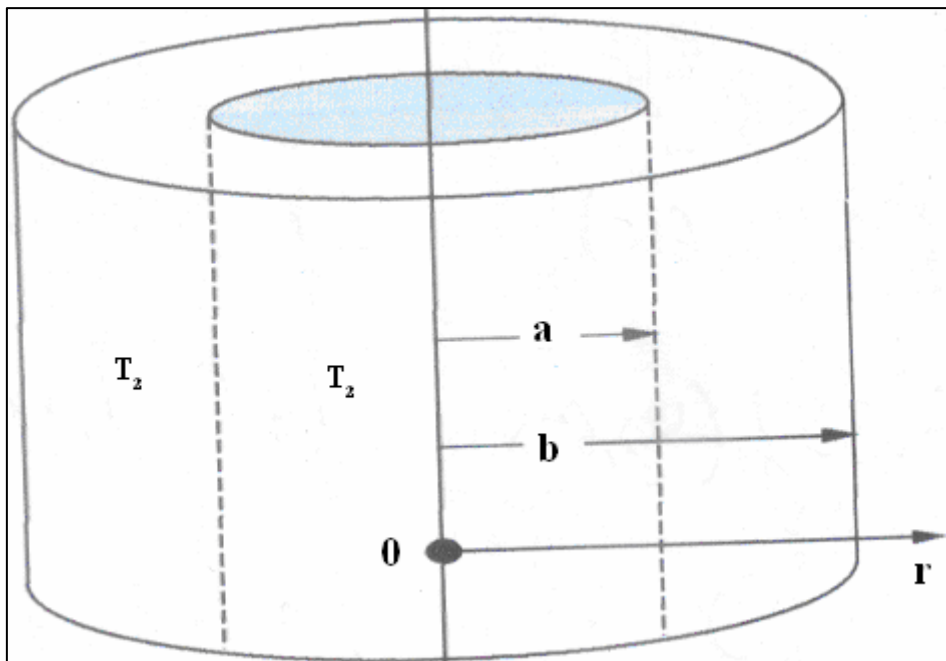
**Segunda etapa** – É feita a validação da solução numérica para o problema de condução de calor em um tubo com  $N$  camadas e com geração de calor é dada pela comparação com a solução analítica gerada pelo método de transformada integral do problema de condução de calor em um tubo simples com geração de calor. Nesse caso tem-se a variação da temperatura expressa em função de  $r$ ,  $\phi$  e  $t$ .

### 3.1 PRIMEIRA ETAPA

Considere um tubo composto de duas camadas onde existe uma região interna de  $0 \leq r \leq a$  e uma região externa de  $a \leq r \leq b$  em que  $r=a$ , existe um contato térmico perfeito entre os materiais, conforme mostrada na figura 3.1. Suponha que  $k_1$  e  $k_2$  são as condutividades térmicas, e  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  são as difusividades térmicas para as regiões interna e externa, respectivamente (MASOOD, K., 2006).

A distribuição da temperatura varia com o raio e com tempo, e as variações da temperatura nas coordenadas  $\theta$  e  $z$  foram desconsideradas. Na região interna, essa distribuição é dada por  $T_1(r, t)$  e na região externa é dada por  $T_2(r, t)$ .

A temperatura da água do mar, que circunda a tubulação e provoca seu resfriamento, tem o valor  $T_\infty$ , enquanto o coeficiente de troca de calor convectivo entre o tubo e a água do mar tem o valor  $h$ .



**FIG. 3.1** Esquema de duto com duas camadas

As equações que governam a distribuição da temperatura nas duas regiões são:

$$\frac{\alpha_1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_1(r, t)}{\partial r} \right) = \frac{\partial T_1(r, t)}{\partial t} \quad \text{Em } 0 \leq r \leq a, t > 0, \quad (3-1. a)$$

$$\frac{\alpha_2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_2(r,t)}{\partial r} \right) = \frac{\partial T_2(r,t)}{\partial t} \quad \text{Em } \mathbf{a} \leq \mathbf{r} \leq \mathbf{b}, \mathbf{t} > 0, \quad (3-1. b)$$

Para resolver o problema (3-1a) e (3-1b), foram incluídas as condições de contorno abaixo:

$$\frac{\partial T_1(r,t)}{\partial r} = 0 \quad \text{Em } \mathbf{r} = \mathbf{0}, \mathbf{t} > 0 \quad (3-1. c)$$

$$T_1(r,t) = T_2(r,t) \quad \text{Em } \mathbf{r} = \mathbf{a}, \mathbf{t} > 0 \quad (3-1. d)$$

$$k_1 \frac{\partial T_1(r,t)}{\partial r} = k_2 \frac{\partial T_2(r,t)}{\partial r} \quad \text{Em } \mathbf{r} = \mathbf{a}, \mathbf{t} > 0 \quad (3-1. e)$$

$$k_2 \frac{\partial T_2(r,t)}{\partial r} + HT_2(r,t) = HT_\infty \quad \text{Em } \mathbf{r} = \mathbf{b}, \mathbf{t} > 0 \quad (3-1.f)$$

A condição de contorno (3-1c) garante a simetria do problema. A condição de contorno (3-1. d) implica que o contato térmico vai ser perfeito entre as temperaturas na interface. Já condição de contorno (3-1. e) significa que o contato térmico vai ser perfeito entre os fluxos de calor na interface. Por fim, a condições de contorno (3-1. f) implica na troca de calor entre o tubo com a água do mar.

E para condições iniciais para cada camada

$$T_1(\mathbf{r}, \mathbf{t}) = f_1 \quad \text{em } 0 \leq \mathbf{r} \leq \mathbf{a} \text{ para } \mathbf{t} = 0 \quad (3-1. g)$$

$$T_2(\mathbf{r}, \mathbf{t}) = f_2 \quad \text{em } \mathbf{a} \leq \mathbf{r} \leq \mathbf{b} \text{ para } \mathbf{t} = 0 \quad (3-1. h)$$

A temperatura inicial para a camada mais interna é dada por  $f_1$  e a temperatura inicial para a camada mais externa é dada por  $f_2$ .

### 3.2 DEFINIÇÃO DE NOVAS VARIÁVEIS

Para encontrar as soluções analíticas do problema, algumas variáveis foram re-escritas de uma na nova forma:

$$\theta = T - T_\infty \quad (3-2)$$

$$h = \frac{H}{k} \quad (3-3)$$

$$\gamma \equiv \frac{a\beta_n}{\sqrt{\alpha_1}} \quad (3-4)$$

$$\eta \equiv \frac{b\beta_n}{\sqrt{\alpha_2}} \quad (3-5)$$

$$H^* \equiv \frac{bh}{k_2} \quad (3-6)$$

$$k_{ad} \equiv \frac{k_1}{k_2} \sqrt{\frac{\alpha_2}{\alpha_1}} \quad (3-7)$$

Assim temos a nova formulação dado por:

$$\frac{\alpha_1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \theta_1(r,t)}{\partial r} \right) = \frac{\partial \theta_1(r,t)}{\partial t} \quad \text{Em } 0 \leq r \leq a, t > 0, \quad (3-8.a)$$

$$\frac{\alpha_2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \theta_2(r,t)}{\partial r} \right) = \frac{\partial \theta_2(r,t)}{\partial t} \quad \text{Em } a \leq r \leq b, t > 0, \quad (3-8.b)$$

Sujeitos às condições de contorno, abaixo:

$$\frac{\partial \theta_1(r,t)}{\partial r} = 0 \quad \text{Em } r=0, t > 0 \quad (3-8.c)$$

$$\theta_1(r,t) = \theta_2(r,t) \quad \text{Em } r=a, t > 0 \quad (3-8.d)$$

$$k_1 \frac{\partial \theta_1(r,t)}{\partial r} = k_2 \frac{\partial \theta_2(r,t)}{\partial r} \quad \text{Em } r=a, t > 0 \quad (3-8.e)$$

$$k_2 \frac{\partial \theta_2(r,t)}{\partial r} + h \theta_2(r,t) = 0 \quad \text{Em } r=b, t > 0 \quad (3-8.f)$$

Com as condições iniciais

$$\theta_1(r,t) = f_1 - T_\infty \quad \text{Em } 0 < r < a \text{ para } t=0 \quad (3-8.g)$$

$$\theta_2(r,t) = f_2 - T_\infty \quad \text{Em } a < r < b \text{ para } t=0 \quad (3-8.h)$$

### 3.3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PARA PRIMEIRA ETAPA:

Para resolver o problema de condução de calor (3.8), aplicou-se a técnica de separação de variáveis, considerando que a solução desejada possa ser expressa como o produto de duas funções, uma que depende unicamente de  $r$  a outra que depende unicamente de  $t$ . Ou seja, considerando a existência de uma solução da forma:

$$\theta_{ii}(r,t) = \psi_{ii}(r) \Gamma(t) \quad ii = 1, 2 \quad (3-8.i)$$

Quando introduz a equação (3-8. i) em (3-8.a), obtêm-se:

$$\alpha_{ii} \frac{1}{r} \frac{1}{\psi_{ii}(r)} \frac{d}{dr} \left( r \frac{d\psi_{ii}(r)}{dr} \right) = \frac{1}{\Gamma(t)} \frac{d\Gamma(t)}{dt} \quad (3-8.j)$$

Fica evidente que a equação diferencial é, de fato, separável, pois o lado esquerdo da equação depende unicamente de  $r$ , e o lado direito depende unicamente de  $t$ . Portanto, a igualdade pode ser aplicada em geral, apenas se ambos os lados forem iguais à mesma constante. Identifica-se que essa constante de separação, até o momento desconhecida, como  $-\beta^2$ , tem-se então

$$\alpha_{ii} \frac{1}{r} \frac{1}{\psi_{ii}(r)} \frac{d}{dr} \left( r \frac{d\psi_{ii}(r)}{dr} \right) = \frac{1}{\Gamma(t)} \frac{d\Gamma(t)}{dt} \equiv -\beta^2 \quad (3-8.l)$$

Observe que a designação de  $-\beta^2$  como uma constante negativa, foi necessária, pois, se ela fosse positiva ou nula, seria impossível obter uma solução que satisfizesse as condições de contorno. Recordando que, separando as variáveis do problema de condução de calor em uma única região, coloca-se a difusividade térmica  $\alpha$  juntamente com a função que varia com tempo. Para separação de variável para um problema multi-região, a difusividade térmica  $\alpha_i$  é combinada com o a função envolvendo variável do espaço.

A separação da equação (3-8. h), resulta nas seguintes funções para  $\Gamma(t)$  e  $\psi_i(r)$

$$\frac{d\Gamma(t)}{dt} + \beta_n^2 \Gamma(t) = 0 \quad (3-8. m)$$

e

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{d\psi_i(r)}{dr} \right) + \frac{\beta_n^2}{\alpha_i} \psi_{ii}(r) = 0 \quad (3-8. n)$$

Onde  $\psi_{in} \equiv \psi_{ii}(\beta_n, r)$ , o expoente  $n$  implica na existência de infinitos valores para autovalores  $\beta_1 < \beta_2 < \dots < \beta_n < \dots$  que correspondem às autofunções  $\psi_{in}$ .

Os autovalores correspondentes ao problema são dados por:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{d\psi_{1n}}{dr} \right) + \frac{\beta_n^2}{\alpha_1} \psi_{1n}(r) = 0 \quad \text{Em } 0 \leq r < a, t > 0, \quad (3-9)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{d\psi_{2n}}{dr} \right) + \frac{\beta_n^2}{\alpha_2} \psi_{2n}(r) = 0 \quad \text{Em } a < r < b, t > 0, \quad (3-10)$$

Sujeito às condições de fronteiras abaixo:

$$\frac{\partial \psi_{1n}(r)}{\partial r} = 0 \quad \text{Em } r=0, t>0 \quad (3-11. a)$$

$$\psi_{1n}(r, t) = \psi_{2n}(r, t) \quad \text{Em } r=a, t>0 \quad (3-11. b)$$

$$k_1 \frac{d\psi_{1n}(r, t)}{dr} = k_2 \frac{d\psi_{2n}(r, t)}{dr} \quad \text{Em } r=a, t>0 \quad (3-11. c)$$

$$k_2 \frac{d\psi_{2n}(r, t)}{dr} + h\psi_{2n} = 0 \quad \text{Em } r=b, t>0 \quad (3-11. d)$$

A solução geral para o problema de autovalores, acima, está disponível na tabela 8-1 (ÖZISIK, M. N. 1980), daí tem-se:

$$\psi_{in}(r) = A_{in} J_0 \left( \frac{\beta_n}{\sqrt{\alpha_i}} r \right) + B_{in} Y_0 \left( \frac{\beta_n}{\sqrt{\alpha_i}} r \right), \quad i=1,2 \quad (3-12)$$

A condição de fronteira (3-11a) requer que  $B_{1n}=0$ , Portanto as soluções  $\psi_{in}(r)$  se dividem em duas regiões:

$$\psi_{1n}(r) = J_0 \left( \frac{\beta_n}{\sqrt{\alpha_1}} r \right) \quad \text{Em } 0 \leq r < a \quad (3-13. a)$$

$$\psi_{2n}(r) = A_{2n} J_0 \left( \frac{\beta_n}{\sqrt{\alpha_2}} r \right) + B_{2n} Y_0 \left( \frac{\beta_n}{\sqrt{\alpha_2}} r \right) \quad \text{Em } a < r < b \quad (3-13. b)$$

Os coeficientes  $A_{2n}$  e  $B_{2n}$  são determinados como:

$$A_{2n} = \frac{1}{\Delta} \left[ J_0(\gamma) Y_1 \left( \frac{a}{b} \eta \right) - k_{ad} J_1(\gamma) Y_0 \left( \frac{a}{b} \eta \right) \right] \quad (3-14. a)$$

$$B_{2n} = \frac{1}{\Delta} \left[ k_{ad} J_1(\gamma) J_0 \left( \frac{a}{b} \eta \right) - J_0(\gamma) J_1 \left( \frac{a}{b} \eta \right) \right] \quad (3-14. b)$$

$$\Delta = J_0 \left( \frac{a}{b} \eta \right) Y_1 \left( \frac{a}{b} \eta \right) - J_1 \left( \frac{a}{b} \eta \right) Y_0 \left( \frac{a}{b} \eta \right) \quad (3-14c)$$

Enfim, para determinar os autovalores, com o objetivo de descobrir os valores dos coeficientes (3-14), temos que, os  $\beta_n$ 's são encontrados na equação transcendental a seguir:

$$\begin{vmatrix} J_0(\gamma) & -J_0\left(\frac{a}{b}\eta\right) & -Y_0\left(\frac{a}{b}\eta\right) \\ K_{ad}J_1(\gamma) & -J_1\left(\frac{a}{b}\eta\right) & -Y_1\left(\frac{a}{b}\eta\right) \\ 0 & \frac{H^*}{\eta}J_0(\eta) - J_1(\eta) & \frac{H^*}{\eta}Y_0(\eta) - Y_1(\eta) \end{vmatrix} = 0 \quad (3-15)$$

Existindo a estabilidade entre os coeficientes (3-14) e os autovalores  $\beta_n$ , pode-se encontrar as autofunções  $\psi_{1n}(r)$  e  $\psi_{2n}(r)$ , de acordo com as equações (3-13). Então, a solução para temperatura  $\theta_{ii}(r,t)$ ,  $i=1,2$ , fica:

$$\theta_{ii}(r,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{N_n} e^{-\beta_n^2 t} \psi_{iin}(r) \left[ \frac{k_1}{\alpha_1} \int_0^a r' \psi_{1n}(r') F_1(r') dr' + \frac{k_2}{\alpha_2} \int_a^b r' \psi_{2n}(r') F_2(r') dr' \right] \quad (3-16)$$

$ii=1,2$

Onde,

$$N_n = \frac{k_1}{\alpha_1} \int_0^a r' \psi_{1n}^2(r') dr' + \frac{k_2}{\alpha_2} \int_a^b r' \psi_{2n}^2(r') dr' \quad (3-17. a)$$

$$\psi_{1n}(r) = J_0\left(\frac{\beta_n}{\sqrt{\alpha_1}} r\right) \quad (3-17. b)$$

$$\psi_{2n}(r) = A_{2n} J_0\left(\frac{\beta_n}{\sqrt{\alpha_2}} r\right) + B_{2n} Y_0\left(\frac{\beta_n}{\sqrt{\alpha_2}} r\right) \quad (3-17. c)$$

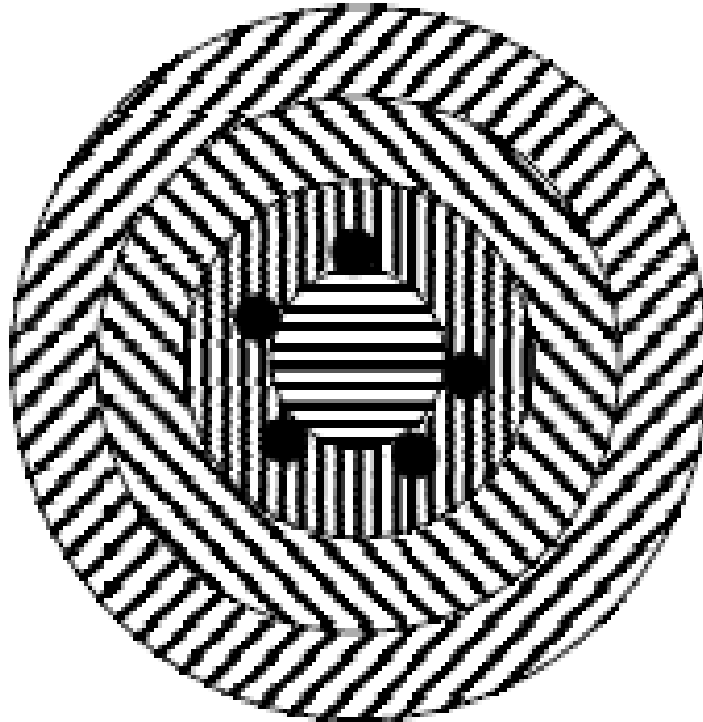
Por fim, a solução para o problema composto (3-1) é:

$$T(r,t) = \theta(r,t) + T_{\infty} \quad (3-18)$$

### 3.4 SEGUNDA ETAPA

A formulação matemática para um tubo de raio  $b$  com aquecimento elétrico ativo é mostrada na figura 3.2. Nesta parte, o tubo composto por  $N$  camadas, é composto por um

único material, com o objetivo de validar o código do programa. Nesse caso, também se tem a variação da temperatura expressa em função de  $r$ ,  $\phi$  e  $t$ .



**FIG. 3.2** Esquema de duto multicamadas com aquecimento elétrico instalado na superfície do tubo interno.

### 3.5 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PARA SEGUNDA ETAPA

O problema a seguir trata-se do problema de condução de calor transiente em um cilindro, onde a temperatura varia em relação a  $\phi$  e  $r$ . Para resolver a equação de condução de calor (3.19), aplicou-se o método de transformada integral nas derivadas em relação à  $r$  e  $\phi$ , para que elas sejam removidas.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{g(\phi)}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(r, \phi, t)}{\partial t} \quad \text{Em } 0 \leq r \leq b, 0 \leq \phi \leq 2\pi, t > 0 \quad (3-19. a)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad \text{Para } r=0, t > 0 \quad (3-19. b)$$



$$k \frac{\partial T}{\partial r} + HT = HT_{\infty} \quad \text{Para } r=b, t>0 \quad (3-19. c)$$

$$T(r, \phi, t) = F(r, \phi) \quad \text{Para } t=0 \quad (3-19. d)$$

Para o ângulo  $\phi$ , foram adotadas as condições de contorno simétricas. Em seguida, foi feita a mudança de variável utilizando (3-2) e (3-3). Onde, obtém - se a nova equação de condução de calor segue abaixo:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \phi^2} + \frac{g(\phi)}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta(r, \phi, t)}{\partial t} \quad \text{Em } 0 \leq r \leq b, 0 \leq \theta \leq 2\pi, t > 0 \quad (3-20. a)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial r} = 0 \quad \text{Para } r=0, t > 0 \quad (3-20. b)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial r} + h\theta = 0 \quad \text{Para } r=b, t > 0 \quad (3-20. c)$$

$$\theta(r, \phi, t) = F(r, \phi) - T_{\infty} \quad \text{Para } t=0 \quad (3-20. d)$$

Para eliminar as derivadas referentes à  $\phi$ , aplicou-se o método de transformada integral na variável  $\phi$ . Logo, encontra-se a transformação abaixo (ÖZISIK, M. N. 1980):

$$\text{Formula de Inversão: } \theta(r, \phi, t) = \sum_{\nu} \bar{\theta}(r, \nu, t) \frac{\ddot{O}(\nu, \phi)}{N(\nu)} \quad (3-21.a)$$

$$\text{Transformada Integral: } \bar{\theta}(r, \nu, t) = \int_{\phi=0}^{2\pi} \ddot{O}(\nu, \phi') \theta(r, \phi', t) d\phi' \quad (3-21.b)$$

De acordo com a condição de contorno (3-20. d), encontram-se os valores para a autofunção  $\ddot{O}(\nu, \phi)$  e para a norma  $N(\nu)$  dos autovalores  $\nu$ , que são obtidas de acordo com a tabela 2-2 (ÖZISIK, M. N. 1980); Quando se aplica os dados da tabela, tem-se:

$$\text{Formula de Inversão: } \theta(r, \phi, t) = \frac{1}{\pi} \sum_{\nu} \bar{\theta}(r, \nu, t) \quad (3-22.a)$$

$$\text{Transformada Integral: } \bar{\theta}(r, \nu, t) = \int_{\phi=0}^{2\pi} \cos \nu(\phi - \phi') \theta(r, \phi', t) d\phi' \quad (3-22.b)$$

Em que,  $\nu=0, 1, 2, 3, \dots$ . Porém, deve-se trocar  $\pi$  por  $2\pi$  quando  $\nu=0$ , porque nesse caso a temperatura não varia em relação à  $\phi$  e que o fluxo de calor é considerado contínuo. Aplicando a transformada integral da equação do calor (3-20), tem-se:

$$\frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial r} + \frac{\nu^2}{r^2} \bar{\theta} + \frac{\bar{g}(\nu)}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \bar{\theta}(r, \nu, t)}{\partial t} \quad \text{Em } 0 \leq r \leq b, 0 \leq \theta \leq 2\pi, t > 0 \quad (3-23. a)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial r} = 0 \quad \text{Para } r=0, t > 0 \quad (3-23. b)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial r} + h \bar{\theta} = 0 \quad \text{Para } r=b, t > 0 \quad (3-23. c)$$

$$\theta(r, \phi, t) = F(r, \phi) - T_\infty \quad \text{Para } t=0 \quad (3-23. d)$$

Onde a barra denota a transformada integral em relação à variável  $\phi$ . Em seguida, é eliminada a derivada em relação à  $r$ , aplicando a transformada integral para a variável  $r$  em relação à nova função  $\bar{\theta}(r, \phi, t)$ , obtendo assim, as formulas abaixo:

$$\text{Formula de Inversão: } \bar{\theta}(r, \nu, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{R_\nu(\beta_m, r)}{N(\beta_m)} \bar{\theta}(\beta_m, \nu, t) \quad (3-24.a)$$

$$\text{Transformada Integral: } \bar{\theta}(\beta_m, \nu, t) = \int_0^b r' R_\nu(\beta_m, r') \bar{\theta}(r', \nu, t) dr' \quad (3-24.b)$$

Em que,  $R_\nu(\beta_m, r)$  as autofunções e  $N(\beta_m)$  a norma dos autovalores  $\beta_m$  associação com o problema mostrado pela equação (3-20). As funções  $R_\nu(\beta_m, r)$  e  $N(\beta_m)$  e os autovalores  $\beta_m$  são obtidos na tabela 3-1 com três diferentes condições de fronteira para  $r=b$ , (ÖZISIK, M. N. 1980).

Daí encontra-se as equações (3-25. a) e (3-25. b) que são as aplicações da transformada para  $r$  e para o sistema (3-22).

$$\frac{\alpha}{k} \bar{g}(\beta_m, \nu, t) + \alpha b \frac{R_\nu(\beta_m, r)}{k} \Big|_{r=b} \bar{f}(\nu, t) = \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \alpha \beta_m^2 T(\beta_m, \nu, t) \quad (3-25.a)$$

$$\bar{T}(r, \phi, t) = \bar{F}(\beta_m, \nu) \quad \text{Para } t=0 \quad (3-25.b)$$

Resolvendo as equações (3-25) para  $\bar{\theta}(r, v, t)$  e o valor de  $\theta$  através das sucessivamente aplicações das fórmulas inversão (3-24.a) e (3-22.a). Por fim, as equações (3-26) têm-se a solução do problema (3-20):

$$\theta(r, \varphi, t) = \frac{1}{\pi} \sum_v \sum_{m=1}^{\infty} \frac{R_v(\beta_m, r)}{N(\beta_m)} e^{-\alpha\beta_m^2 t} \left[ \bar{F}(\beta_m, v) + \int_{t'=0}^t e^{\alpha\beta_m^2 t'} A(\beta_m, v, t') dt' \right] \quad (3-26. a)$$

Onde

$$A(\beta_m, v, t) = \frac{\alpha}{k} \bar{g}(v) \quad (3-26. b)$$

$$\bar{f}(v, t) = \int_{\phi=0}^{2\pi} f_2(\phi', t) \cos v(\phi - \phi') d\phi' \quad (3-26. c)$$

$$\bar{F}(\beta_m, v) = \int_{r'=0}^b \int_{\phi'=0}^{2\pi} r' R_v(\beta_m, r') \cos v(\phi - \phi') F(r, \phi) d\phi' dr' \quad (3-26. d)$$

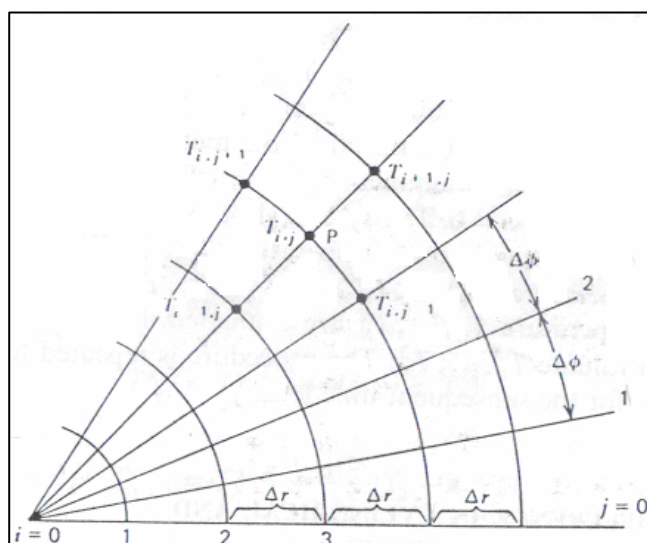
$$\bar{g}(v) = \int_{r'=0}^b \int_{\phi'=0}^{2\pi} r' R_v(\beta_m, r') \cos v(\phi - \phi') g(r', \phi', t') d\phi' dr' \quad (3-26. e)$$

Os  $\beta_n$  são encontrados pela equação abaixo.

$$\beta_m J'_v(\beta_m b) + H J_v(\beta_m b) = 0 \quad (3-26. f)$$

### 3.6 SOLUÇÃO NUMÉRICA

Nessa seção, será apresentado o Método Implícito de Diferenças Finitas (ANDERSON, TANNHILL e PLETCHER, 1984) para a discretização do problema de condução de calor multicamadas dado pela equação (3-27). A idéia básica de qualquer método numérico consiste em se transformar um domínio contínuo em um problema discreto, com um número finito de pontos nodais, Fig. (3.3), e a solução é obtida resolvendo-se um sistema de equações algébricas. No método de diferenças finitas a discretização é feita aproximando-se as derivadas das grandezas envolvidas por quocientes de diferenças dessas variáveis.



**FIG. 3.3.** Notação para a malha computacional utilizada na aproximação por diferenças finitas.

Considerando novamente o sistema bidimensional da figura 3.3, sob condições transientes com propriedades constantes e com geração de calor interna, o problema de calor em coordenadas cilíndricas é dado pela equação (3-27. a), onde assume-se que há uma troca de calor por convecção entre o tubo com o meio externo.

Adotando as hipóteses de que as camadas desse duto estão em perfeito contato térmico nas interfaces, considerando para a variação em  $r$ , considerando as condições de contorno simétricas para  $\phi$ , foram adotadas. E supondo também que o tubo esteja a uma temperatura inicial de  $60^\circ\text{C}$ , tem-se:

$$\frac{\partial^2 T_{ii}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{ii}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_{ii}}{\partial \phi^2} + \frac{g_{ii}(\phi)}{k_{ii}} = \frac{1}{\alpha_{ii}} \frac{\partial T_{ii}(r, \phi, t)}{\partial t} \quad \text{Em } 0 \leq r \leq b, 0 \leq \phi \leq 2\pi, \quad (3-27. a)$$

$$t > 0, ii = 1, \dots, b$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad \text{Para } r = 0 \quad (3-27. b)$$

$$k_b \frac{\partial T}{\partial r} + HT_b = HT_\infty \quad \text{Para } r = b \quad (3-27. c)$$

$$T_{ii} = T_{ii+1} \quad \text{Para } r = r_{ii}, ii = 1, \dots, b-1 \quad (3-27. d)$$

$$k_{ii} \frac{\partial T_{ii}}{\partial r} = k_{ii+1} \frac{\partial T_{ii+1}}{\partial r}$$

$$T_{ii}(r, \phi, t) = 60^\circ\text{C} \quad \text{Para } t = 0 \quad (3-27. e)$$

Nota-se que nas equações (3-27) aparece o índice  $ii$  que representa o número total de camadas do PIP.

Para determinação da distribuição de temperatura pelo método de diferenças finitas, foram utilizados os índices  $i$  e  $j$  dos pontos discretos para as variáveis  $r$  e  $\phi$ , respectivamente. Contudo, além de ser discretizado em relação à posição, o problema deve ser discretizado em relação ao tempo. O inteiro  $p$  é introduzido para esse propósito. A discretização das derivadas fica da forma

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{T_{i+1,j}^{p+1} - 2T_{i,j}^{p+1} + T_{i-1,j}^{p+1}}{\Delta r^2} \quad (3-28. a)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{T_{i+1,j}^{p+1} - T_{i-1,j}^{p+1}}{2\Delta r} \quad (3-28. b)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} = \frac{T_{i,j+1}^{p+1} - 2T_{i,j}^{p+1} + T_{i,j-1}^{p+1}}{\Delta \phi^2} \quad (3-28. c)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{i,j}^{p+1} - T_{i,j}^p}{\Delta t} \quad (3-28. d)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \phi} = \frac{T_{i,j+1}^{p+1} - T_{i,j-1}^{p+1}}{2\Delta \phi} \quad (3-28. e)$$

Onde  $\Delta r$  e  $\Delta \phi$  variam, a fim de realizar uma convergência de malha, para produzir resultados satisfatórios. Utilizando os resultados da Eq. (3-28) em (3-27. a), tem-se:

$$\frac{T_{i+1,j}^{p+1} - 2T_{i,j}^{p+1} + T_{i-1,j}^{p+1}}{\Delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{T_{i+1,j}^{p+1} - T_{i-1,j}^{p+1}}{2\Delta r} + \frac{1}{r^2} \frac{T_{i,j+1}^{p+1} - 2T_{i,j}^{p+1} + T_{i,j-1}^{p+1}}{\Delta \phi^2} + \frac{g}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{T_{i,j}^{p+1} - T_{i,j}^p}{\Delta t} \quad (3-29.a)$$

Ou seja,

$$\begin{aligned} & (2\alpha r^2 \Delta \phi^2 \Delta t + \alpha r \Delta r^2 \Delta \phi^2 \Delta t) T_{i+1,j}^{p+1} + (-4\alpha r^2 \Delta \phi^2 \Delta t - 4\alpha \Delta r^2 \Delta t - 2r^2 \Delta \phi^2 \Delta r^2) T_{i,j}^{p+1} + \\ & + (2\alpha r^2 \Delta \phi^2 \Delta t - \alpha r \Delta r^2 \Delta \phi^2 \Delta t) T_{i-1,j}^{p+1} + (2\alpha \Delta r^2 \Delta t) T_{i,j+1}^{p+1} + (2\alpha \Delta r^2 \Delta t) T_{i,j-1}^{p+1} + \\ & + (2\alpha r^2 \Delta r^2 \Delta \phi^2 \Delta t) \left( \frac{g}{k} \right) = (-2r^2 \Delta r^2 \Delta \phi^2) T_{i,j}^p \end{aligned} \quad (3-29.b)$$

A equação (3-29) é da equação de condução de calor discretizada para um sistema com  $N$  camadas. Ela é escrita para todos os nós do domínio interno computacional e para os nós das

fronteiras, onde são aplicadas as condições de contorno discretizadas através das equações (3-26). São encontradas condições fictícias para as temperaturas  $T_{1,j}^{p+1}$  em  $r=0$  e  $T_{b,j}^{p+1}$  em  $r=b$ , que podem ser eliminadas por meio das condições de contorno, por exemplo, para eliminar utilizando as condições de contorno (3-27. b) e (3-27. c), conforme mostrado a seguir.

Substituindo a eq. (3.28.b) há (3.27.b) tem-se

$$\frac{T_{2,j}^{p+1} - T_{0,j}^{p+1}}{2\Delta r} = 0 \quad (3-30. a)$$

ou

$$T_{0,j}^{p+1} = T_{2,j}^{p+1} \quad (3-30.b)$$

Introduzindo (3-30) em (3-29) para eliminar a temperatura fictícia  $T_{0,j}^{p+1}$ , tem-se a discretização em diferenças finitas para a equação (3-27. b), Ou seja:

$$\begin{aligned} & (4\alpha r^2 \Delta \varphi^2 \Delta t) T_{2,j}^{p+1} + (-4\alpha r^2 \Delta \varphi^2 \Delta t - 4\alpha \Delta r^2 \Delta t - 2r^2 \Delta \varphi^2 \Delta r^2) T_{1,j}^{p+1} + \\ & + (2\alpha \Delta r^2 \Delta t) T_{1,j+1}^{p+1} + (2\alpha \Delta r^2 \Delta t) T_{1,j-1}^{p+1} + (2\alpha r^2 \Delta r^2 \Delta \varphi^2 \Delta t) \left( \frac{g}{k_l} \right) = (-2r^2 \Delta r^2 \Delta \varphi^2) T_{1,j}^p \end{aligned} \quad (3-31)$$

Para a condição (3-27.c), tem-se a discretização pelo método implícito de diferenças finitas demonstrado pela equação (3-30)

$$k_b \frac{T_{b+1,j}^{p+1} - T_{b-1,j}^{p+1}}{2\Delta r} + HT_{b,j}^{p+1} = HT_\infty \quad (3-32. a)$$

Ou

$$T_{b+1,j}^{p+1} = T_{b-1,j}^{p+1} - \frac{2\Delta r H}{k_b} T_{b,j}^{p+1} + \frac{2\Delta r H}{k_b} T_\infty \quad (3-32. b)$$

Introduzindo (3-32) em (3-29) para eliminar a temperatura fictícia  $T_{q,j}^{p+1}$ , tem-se a discretização em diferenças finitas para a equação (3-27. c), Ou seja:

$$\begin{aligned}
& \left( 2\alpha r^2 \Delta \varphi^2 \Delta t + \alpha r \Delta r^2 \Delta \varphi^2 \Delta t \right) \left( T_{b-1,j}^{p+1} - \frac{2\Delta r H}{k_b} T_{b,j}^{p+1} + \frac{2\Delta r H}{k_b} T_{\infty} \right) + \\
& \left( -4\alpha r^2 \Delta \varphi^2 \Delta t - 4\alpha \Delta r^2 \Delta t - 2r^2 \Delta \varphi^2 \Delta r^2 \right) T_{b,j}^{p+1} + \\
& + \left( 2\alpha r^2 \Delta \varphi^2 \Delta t - \alpha r \Delta r^2 \Delta \varphi^2 \Delta t \right) T_{b-1,j}^{p+1} + \left( 2\alpha \Delta r^2 \Delta t \right) T_{b,j+1}^{p+1} + \\
& \left( 2\alpha \Delta r^2 \Delta t \right) T_{b,j-1}^{p+1} + \left( 2\alpha r^2 \Delta r^2 \Delta \varphi^2 \Delta t \right) \left( \frac{g}{k_b} \right) = \left( -2r^2 \Delta r^2 \Delta \varphi^2 \right) T_{b,j}^p
\end{aligned} \tag{3-33}$$

Apesar da discretização implícita apresenta uma solução incondicionalmente estável (ANDERSON, TANNHILL E PLETCHER, 1984). Deve-se lembrar que, quanto maiores os valores de  $\Delta t$  empregados, maiores também serão os erros locais de truncamento associados à discretização temporal. Dessa forma, foi utilizado na solução um valor de  $\Delta t$  até duzentas vezes maiores, que o permitido pelo critério de estabilidade do Método Explícito (ANDERSON, TANNHILL E PLETCHER, 1984), apresentado a seguir.

$$\alpha \Delta t \left[ \frac{1}{\Delta x^2} \right] \leq \frac{1}{2} \tag{3-34}$$

Onde  $\alpha$  é a difusividade térmica do domínio avaliado.

O critério foi analisado em todas as camadas, sempre sendo escolhido no máximo o  $\Delta t$  de menor valor.

O sistema linear resultante da discretização da equação da condução de calor, dado pela equação (3-28), (3-31) e (3-33) foi resolvido pelo método ADI (FORTUNA, A. O., 2000).

A vantagem do método ADI é que, para cada passo no tempo são resolvidos dois sistemas tridiagonais pelo método de Thomas (FORTUNA, A. O., 2000), o que acelera consideravelmente a solução deste problema.

## CAPITULO 4

### 4 OTIMIZAÇÃO

A otimização consiste em descobrir a maneira mais eficiente de executar um processo ou uma tarefa. Assim, para se alcançar um resultado melhor, é necessário se minimizar ou maximizar a utilização ou obtenção de determinados recursos. Por isso, a necessidade de otimizar é de extrema importância no mundo globalizado, pois há redução de custos e, conseqüentemente, o aumento de investimentos, que poderão ser revertidos para um crescimento na produtividade, trazendo um grande interesse aos investidores da economia capitalista.

Neste capítulo, serão apresentados os métodos de otimização e a programação feita no software modeFrontier® para a otimização da espessuras das camadas isolante, das posições e as potências dos aquecedores elétricos. Para as camadas isolantes foram utilizados dois materiais: o polipropileno, a lã mineral e a combinação do polipropileno com a lã mineral, visando diminuir os gastos com material isolante. O objetivo desse trabalho é de minimizar o custo de instalação dos materiais isolantes e o custo de operação dos cinco aquecedores elétricos de 3.175 mm de espessura e 50 mm de largura, bem como maximizar a temperatura do fluido, com o intuito de evitar a formação de hidratos e a deposição de parafinas nas tubulações de petróleo e gás natural. No entanto, antes será introduzida a noção de otimização mono-objetivo e multi-objetivo, e como elas seriam utilizadas para a resolução do problema de otimização do sistema Pipe-in-Pipe com aquecimento ativo na parede, bem como suas vantagens e desvantagens.

#### 4.1 OTIMIZAÇÃO MONO-OBJETIVO

Para a otimização do sistema Pipe-in-Pipe com aquecimento ativo na parede, utilizando um método de otimização mono-objetivo, tem que se transformar o problema multiobjetivo



em um problema escalar mono-objetivo. Pode-se utilizar pesos diferentes para cada objetivo, de modo a se formar uma função  $g$  que é a combinação linear dos objetivos. O problema escalar resulta em:

$$g(x) = \sum_{i=1}^n w_i g_i(x) \quad (4.1)$$

Onde,  $w_i \geq 0$  é o peso que representa a importância relativa do objetivo  $g_i$  comparando com os outros objetivos.  $x$  é o vetor com os valores. Tendo como meta achar uma solução **ótima** global (máximo ou mínimo), encontra-se uma solução única. Porém, esta técnica tem desvantagens, pois ao dar valores aos pesos, pode-se influenciar a solução dando mais importância a um dos objetivos.

## 4.2 SOLUÇÕES DE PARETO

Em um problema de otimização multi-objetivo, as soluções são comparadas através da propriedade de não-dominância DEB, (2001), definida como:

Não-dominância:

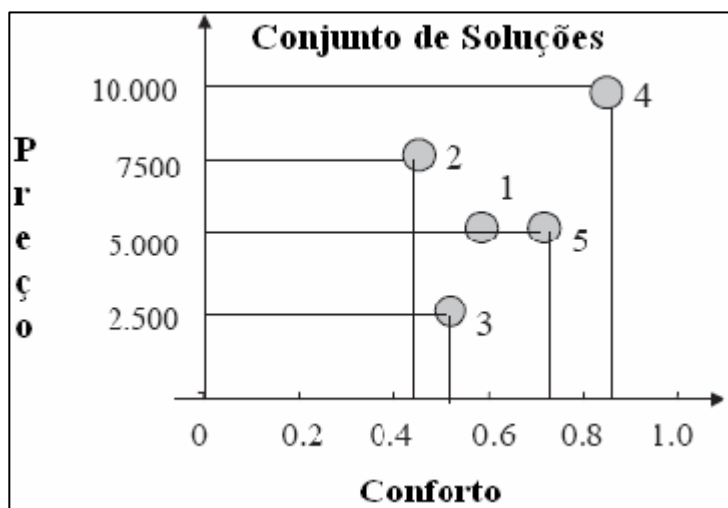
*Seja um problema multiobjetivo, com  $k$  funções objetivo, para serem minimizadas simultaneamente. Uma solução  $y_1$  domina uma solução  $y_2$ , se  $y_1$  é melhor que  $y_2$  em pelo menos um objetivo  $f_i$ , e não é pior que  $y_2$  para qualquer outro objetivo  $f_j$ ,  $j=1, 2, \dots, k$ :*

$$y_1 \text{ domina } y_2 \text{ se } f_i(y_1) < f_i(y_2) \text{ e } f_j(y_1) \leq f_j(y_2)$$

Solução não-dominada ou ótima de Pareto:

*Seja  $P$  um conjunto de soluções. Uma solução  $y_1 \in P$ , que domina qualquer outra solução  $y_2 \in P$  ( $P \subseteq S$ , sendo  $S$  o espaço de busca do problema), é chamada solução não dominada em  $P$ . As soluções que são não dominadas sobre todo o espaço  $S$  são chamadas de soluções ótimas de Pareto (Critério de otimalidade de Pareto).*

Fronteira de Pareto é a curva composta por soluções não dominadas em um espaço contínuo. Uma suposição: procura-se uma casa para comprar sendo que as prioridades colocadas para aquisição da mesma sejam: preço e conforto.



**FIG. 4.1:** Exemplo que ilustra várias opções de compra de casa.

O objetivo é minimizar o custo e maximizar o conforto. Neste caso, têm-se cinco possíveis opções de compra. Intuitivamente, descarta-se a solução 1, já que a solução 5 fornece mais conforto por igual preço. A solução 2 é descartada pela mesma razão. Têm-se então três soluções: 3, 4, 5, que são boas alternativas de compra. Em termos quantitativos, nenhuma é melhor que a outra, pois uma é mais confortável, mas menos barata, e vice-versa. Existe então um “compromisso” entre os objetivos. Quanto maior o conforto, maior o preço e vice-versa.

Diz-se que uma solução domina uma outra se ela é melhor em pelo menos um objetivo, e não é pior em nenhum dos outros objetivos. Por exemplo, a solução 5 domina a solução 1. Então, a solução 5 é não dominada por nenhuma outra. O mesmo acontece com as soluções 3 e 4. Se não se conhece a priori a importância relativa de cada objetivo, pode-se dizer que as soluções 3, 4, e 5 são igualmente boas. Portanto, se existe um conjunto de soluções ótimas, este conjunto é chamado de **conjunto não dominado**. As outras soluções (1 e 2) formam o **conjunto dominado**. Estes conjuntos têm as seguintes propriedades:

1. Quaisquer pares de soluções do conjunto não dominado devem ser não dominados a uma em relação à outra.
2. Quaisquer das soluções não contidas no conjunto não dominado devem ser dominadas por, no mínimo, uma solução no conjunto não dominado.

Os pontos não dominados estão em um espaço contínuo, por isso, pode-se desenhar uma curva. Todos os pontos contidos na curva formam a Frente de Pareto ou Fronteira de Pareto.

### 4.3 OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVO

Para a otimização Multi-objetivo do sistema Pipe-in-Pipe, ao contrário da otimização mono-objetivo, pode-se otimizar cada objetivo individualmente sem precisar fornecer pesos para cada função. Respeitando as restrições de cada objetivo, em geral, não existem soluções ótimas no sentido de minimizarem (ou maximizarem) individualmente todos os objetivos.

A característica principal da otimização multi-objetivo (quando todos os objetivos são de igual importância) é a existência de um conjunto grande de soluções aceitáveis que são superiores às demais. Estas soluções aceitáveis são denominadas soluções Pareto-ótimas ou eficientes. A escolha de uma solução eficiente particular depende das características próprias do problema, que é atribuída ao projetista (*decision maker*). A desvantagem dessa técnica de otimização está na sua implementação, pois a implementação dos métodos multi-objetivos é mais complicado do que a implementação dos métodos de otimização mono-objetivo.

### 4.4 DIFERENÇAS ENTRE OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVO E OTIMIZAÇÃO DE MONO-OBJETIVO

- Nos problemas de otimização com um objetivo, a meta é achar uma solução ótima global (máximo ou mínimo). Já nos problemas multi-objetivos pode existir mais de um ótimo global.
- Outro ponto a ser destacado é a questão do espaço a ser trabalhado. No problema de otimização multi-objetivo existem dois espaços (variáveis e objetivos) no lugar de um. E nos problemas mono-objetivo se trabalha unicamente no espaço de variáveis, pois é procurada apenas uma solução no espaço de objetivos.
- Os métodos de otimização multi-objetivos tratam cada objetivo separadamente, utilizando os demais objetivos como restrições. Portanto, um problema de otimização multi-objetivo pode ser convertido mediante algumas técnicas em um problema de otimização mono-objetivo.

## 4.5 DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

Levou-se em consideração neste trabalho três métodos de otimização multi-objetivos do software modeFrontier®, que foram utilizados para a otimização do problema Pipe-in-Pipe com aquecimento ativo na parede. Os métodos usados foram os seguintes:

- ✓ Multi Objective Game Theory (MOGT) (CLARICH ET AL., 2003);
- ✓ Multi Objective Simulated Annealing Algorithm (MOSA) (RIGONI E., 2003);
- ✓ An efficient Multi-Objective Genetic Algorithm (ARMOGA) (SASAKI D. 2003);

### 4.5.1 TEORIA DOS JOGOS MULTI-OBJETIVOS (MOGT)

Esse método de otimização baseia - se na teoria dos jogos (NASH J.F., 1950) entre jogadores competitivos. Os objetivos e as variáveis da otimização do problema são decompostos entre os jogadores que, através da aplicação de um algoritmo determinístico de otimização mono-objetivo, tal como o Simplex (JALURIA, 1998), tem por objetivo otimizar a função influenciando - se mutuamente pela partilha das melhores soluções obtidas no decurso da otimização. Um ponto de equilíbrio é encontrado como compromisso dos objetivos competitivos.

#### *4.5.1.1 TEORIA DOS JOGOS*

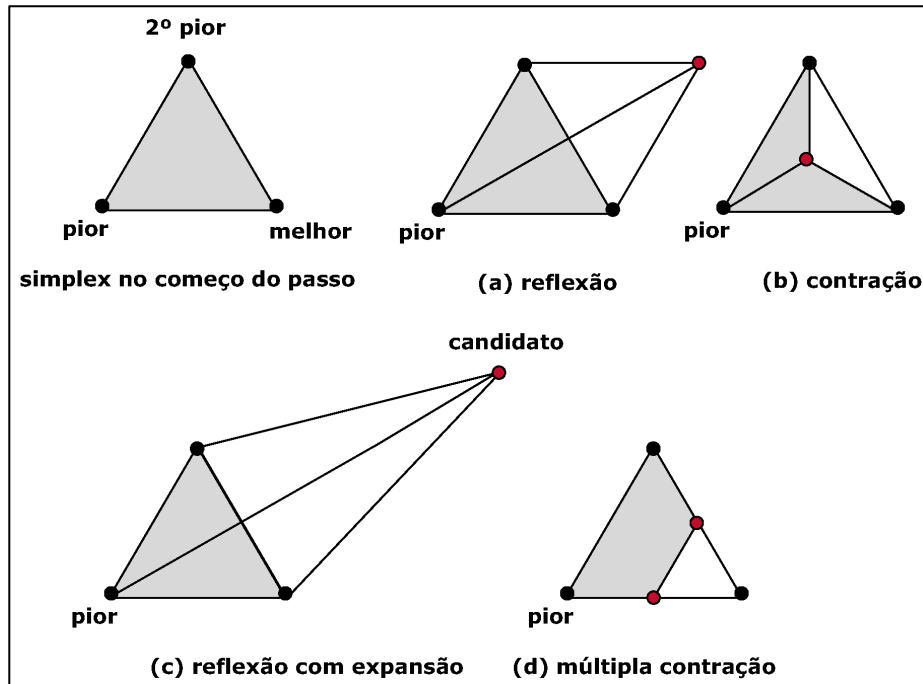
A Teoria dos Jogos (NASH, J.F. 1950) foi formulada matematicamente pelo professor J.F.NASH em 1950, que encontrou sua primeira aplicação na Economia, em particular, na resolução dos problemas a respeito das decisões e seus efeitos em diferentes campos competitivos.

No entanto, estas estratégias também podem ser adotadas em projetos industriais combinadas com os algoritmos evolucionários a fim de se aperfeiçoar um produto seguindo diversos critérios e objetivos com a grande vantagem de um menor tempo computacional, que é, talvez, a primeira necessidade no campo industrial.

#### *4.5.1.2 SIMPLEX*

É um método de otimização robusto e mono-objetivo, uma vez que não utiliza o gradiente da função objetivo. De um ponto de vista geométrico, o simplex é um poliedro contendo  $N + 1$  pontos onde  $N$  é o número de dimensões espaciais. Assim, em duas dimensões é um triângulo, em três dimensões é um tetraedro, e assim por diante. Quando os pontos são equidistantes, o simplex, diz-se ser regular (JALURIA, 1998).

O Simplex é um método que compara os valores das funções objetivos dos  $N + 1$  vértices de um poliedro e, em seguida, move este poliedro progressivamente no sentido do ponto otimizado durante o processo iterativo. Para cada iteração do algoritmo, o simplex tenta substituir os vértices de rendimento elevado, ou seja, função com altos valores para os vértices com valores mais baixos para função. O objetivo do algoritmo simplex é minimizar a vizinhança, movendo ou substituindo vértices, em função da reflexão, expansão e contração. A figura 4.2 mostra um exemplo da aplicação do método Simplex onde no passo (a) tem-se uma reflexão da função, em seguida, no passo (b) tem-se uma contração, depois no passo (c) apresenta uma expansão, e por fim, uma múltipla contração da função a fim de minimizar a função.



**FIG. 4.2.** Descrição esquemática do método simplex

#### 4.5.1.3 ALGORITMO NASH-SIMPLEX

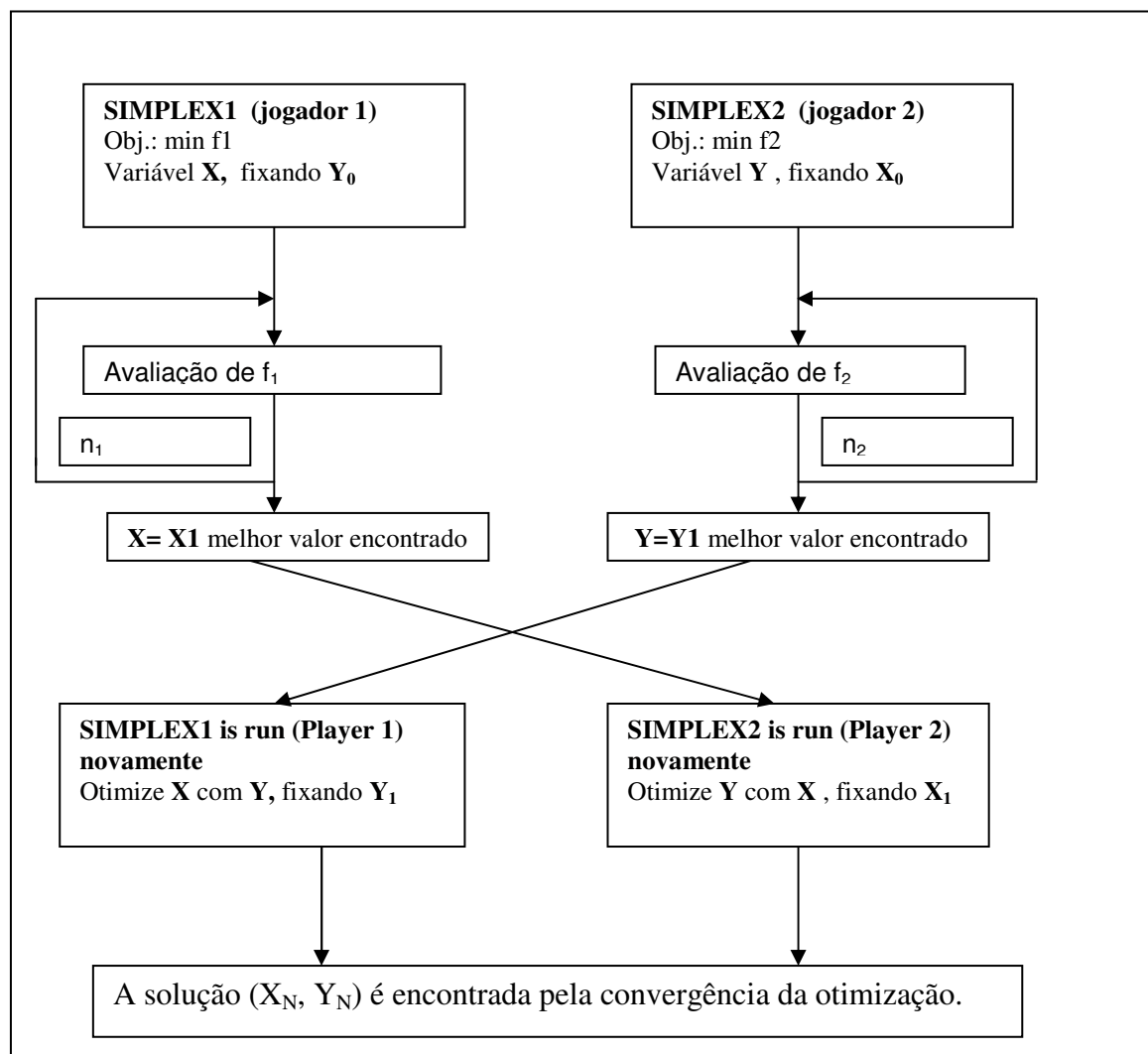
A figura 4.3 ilustra a idéia da Teoria dos Jogos Multi-Objetivos onde é combinada a teoria dos jogos de Nash com o algoritmo Simplex, demonstrando que esta teoria remete a um jogo competidor na busca do equilíbrio de Nash.

Existem dois jogadores com objetivos e espaços de busca diferentes sendo que, os números de jogadores e de objetivos podem ser generalizados. O jogador 1 tem que minimizar a função  $f_1$  considerando a variável  $y$  fixa (ao valor  $y_0$ ) e otimizando apenas a variável  $x$ . Ao mesmo tempo, o jogador 2 tem que minimizar a função  $f_2$  que considera a variável  $x$  fixa (ao valor  $x_0$ ), otimizando apenas a variável  $y$ . Os dois jogadores usam o Simplex como o algoritmo de otimização para seu próprio objetivo.

Após um número definido de iterações simplex, cada jogador encontra uma melhor configuração (jogo de variáveis) para seu objetivo. Contudo, esse não é mínimo global, apenas uma solução melhorada. A partir daí, o jogo continua com uma nova etapa, para que

as variáveis, que foram fixadas por cada jogador, possam ser atualizadas utilizando-se o melhor valor encontrado pelo outro jogador no final da etapa anterior. No Simplex, cada jogador é inicializado pelas melhores soluções  $n+1$  encontradas na etapa precedente, sendo  $n$  o número de variáveis para esse jogador. Por exemplo, o valor  $x_0$  para o jogador 2 é substituído por  $x_1$ , que é o melhor valor encontrado pelo jogador 1 na primeira etapa.. A partir daí, cada jogador tem que utilizar suas estratégias seguindo ainda seu objetivo. Porém, o outro jogador influencia na sua busca, apenas pela estratégia que jogou.

Este é o sentido de um jogo competitivo, sendo que, para isso, é preciso que cada jogador siga seu objetivo em cada etapa, influenciado pelas escolhas do outro jogador, encontrando um ponto do equilíbrio. O ponto de equilíbrio ocorre quando as escolhas dos dois jogadores não se modificam nas etapas subsequentes (por exemplo, quando  $X_n=X_{n-1}$  e  $Y_n=Y_{n-1}$ ).



**FIG. 4.3.** Algoritmo Nash-Simplex

#### 4.5.2 ALGORITMO MULTI-OBJETIVO RECOZIMENTO SIMULADO (MOSA)

O Simulated Annealing (SA) foi derivado de processos de recozimentos de sólidos (METROPOLIS ET AL., 1953). Porém, o método de otimização Recozimento Simulado foi introduzido por KIRKPATRICK ET AL. (1983). O termo *Annealing* refere-se a um processo térmico que começa pela liquefação (quando um gás passa para o estado líquido) de um cristal, a uma alta temperatura, seguido pela lenta e gradativa diminuição da temperatura, até que o ponto de solidificação seja atingido, ou seja, o estado de energia mínima, ou seja, 0°C.

SA é basicamente um algoritmo de busca local. Mas, os algoritmos de busca local apresentam o inconveniente de parar num ótimo local. O Simulated Annealing evita este problema, utilizando uma probabilidade de aceitação de uma solução que piora a solução corrente, o que implica na possibilidade de se escapar de um ótimo local. Esta probabilidade vai diminuindo, à medida que se aproxima da solução ótima. Contudo, o Simulated Annealing utiliza somente a variação do valor da função objetivo nas avaliações dos movimentos, sendo isso considerado uma desvantagem do método.

À medida que as novas soluções são encontradas, elas podem ser aceitas ou não. As soluções que melhoram o valor da função objetivo são sempre aceitas e as soluções que pioram o valor da função objetivo são condicionalmente aceitas dependendo do critério de Metropolis.

A figura 4.4 ilustra a idéia da Probabilidade de aceitação de um movimento de piora (Problema de minimização) em que, na evolução do sistema que é controlada por um parâmetro externo, a temperatura (T). A energia (E) é definida de maneira oportuna, podendo ser atribuída para cada configuração possível do sistema. Quando uma configuração inicial é perturbada, a diferença de energia entre os dois estados poderá ser computada ( $\Delta E = E_{\text{final}} - E_{\text{inicial}}$ ): se o novo Estado é favorável, i.e.  $\Delta E \leq 0$ , então a nova configuração é aceita. Se este não for o caso, onde  $\Delta E > 0$ , o novo estado poderá ser aceito ou rejeitado de acordo com o critério de Metropolis baseado na seguinte função de probabilidade:

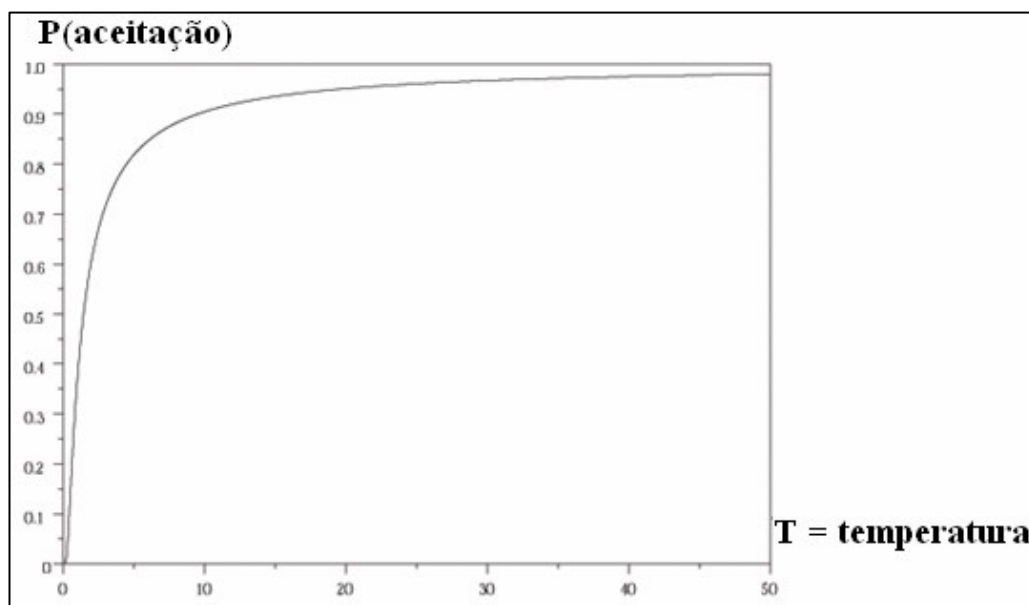
$$P(\Delta E) = \exp(\Delta E/k_b T) \quad (4.2)$$



Em que  $P(\Delta E)$  é a probabilidade do novo estado a ser aceita e  $k$  é a constante de Boltzmann. Nota-se que nesta equação a energia e a temperatura foram devidamente definidas, de forma a ter as mesmas dimensões físicas.

Quando um novo estado é aceito, torna - se o ponto de partida para a próxima perturbação; se for rejeitada, então, a configuração inicial será mantida, e é outra vez, a base de uma outra perturbação.

Agora, o papel da temperatura é evidente: a alta temperatura equivale a uma nova configuração que é sempre aceita, independentemente da variação de energia; porém, quando a temperatura é baixa, todas as transições desfavoráveis serão rejeitadas, mas aquelas com  $\Delta E \leq 0$  serão aceitas.



**FIG. 4.4** - Probabilidade de aceitação de um movimento de piora.

#### 4.5.2.1 ALGORITMO MULTI-OBJETIVO

No caso de um mono-objetivo, em que utiliza o original SA, a energia pode ser facilmente definida quando identificado o custo da função escalar. O problema de definir adequadamente a energia surge no contexto de um conjunto de algoritmos multi-objetivos em que existem muitas funções objetivo.

JASZKIEWICZ (2001) e ULUNGU ET AL. (1999) desenvolveram um método multi-objetivo usando o método convencional original SA chamado MOSA (Multi-objective

*Simulated Annealing*). Este método utiliza as regras de aceitação multi-objetivos. MOSA utiliza um número de vetores de pesos pré-definidos. Cada um dos vetores é associado com um processo de resfriamento independente. Cada processo inicia com uma solução randômica ou uma solução construída por uma heurística especializada. Assim, as soluções executam movimentos que são aceitos com probabilidades definidas por uma regra de aceitação. O resultado do algoritmo é o conjunto de soluções potencialmente Pareto-ótimas contendo todas as soluções não dominadas.

#### 4.5.3 ALGORITMO GENÉTICO MULTI-OBJETIVOS COM INTERVALO ADAPTATIVO (ARMOGA)

Os algoritmos genéticos (GA) representam à classe de metodologias inspiradas nos princípios de seleção e evolução natural, e que utilizam operações baseadas em transformações genéticas, como o cross-over e a mutação (Coley 1999).

Fazendo analogia com os processos de seleção natural, as soluções candidatas são chamadas de *indivíduos*, sendo o conjunto dessas seleções chamado de *população*. No processo de seleção, que pode ser estocástico ou determinístico, os indivíduos de menor adaptabilidade são removidos enquanto que os indivíduos mais aptos se reproduzem gerando descendentes.

A recombinação e a mutação ajudam a gerar novos indivíduos a partir das variações dos indivíduos existentes. O *operador de recombinação (crossover)*, geralmente, efetua a criação de dois novos indivíduos (filhos) a partir de um casal (pais) já existente, utilizando, para simular a natureza estocástica da evolução, uma *probabilidade de recombinação* associada a esse operador. O *operador de mutação* é responsável por modificar o indivíduo através de pequenas variações no seu código genético de acordo com uma *probabilidade de mutação*.

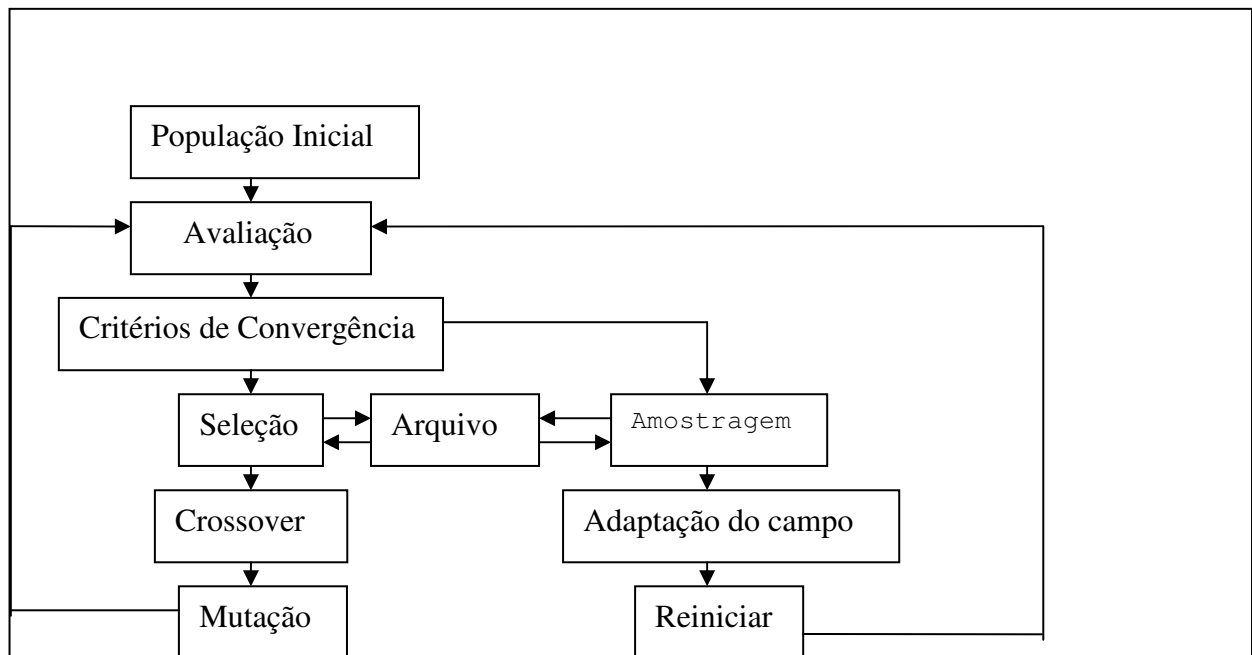
O ARGA (Algoritmo Genético com Intervalo Adaptativo), proposto, inicialmente, por Arakawa e Hagiwara (ARAKAWA, M. AND HAGIWARA, I., 1997, 1998). Esse método utiliza todos os conceitos de um método GA, adicionando um intervalo adaptativo, que adapta a população em direção às regiões promissoras durante o processo de otimização, o que permite ao mesmo tempo uma boa precisão, eficiente e robusta na pesquisa, mantendo uma série de pequenos tamanhos (ARAKAWA, M. AND HAGIWARA, I. 1997,1998).

O *ARMOGA* foi desenvolvido baseado no *ARGA* para lidar com problemas de otimização múltiplos com objetivos de encontrar as soluções Pareto (OYAMA, A. 2000). A principal diferença entre *ARMOGA* e convencionais Multi - Objective Genetic Algorithm (*MOGA*) é a introdução de um Intervalo Adaptativo.

O Intervalo Adaptativo resume-se a uma pesquisa em um intervalo definido. A pesquisa divide uma região em três partes. As regiões são definidas pela concepção inferior e superior das soluções escolhidas. Então, a distribuição normal é considerada em ambos os lados das regiões, sendo definidos pela média e pelo desvio padrão. Com isso, este sistema de codificação fica controlado por parâmetros.

O presente fluxograma do *ARMOGA* é mostrado na figura. 4.5. A população é reinicializada com cada *M* gerações para o intervalo adaptação, com base nas estatísticas das melhores populações ou na *probabilidade de recombinação*. Além disso, o novo espaço é determinado por critérios de decisão. Então, a nova população é gerada pelo novo espaço. A partir daí, todos os operadores genéticos são aplicados para a nova concepção espacial, para que os avanços sejam em direção às regiões de populações promissoras.

As vantagens de *ARMOGA* são as seguintes: é possível obter soluções Pareto eficiente porque as regiões de procura são minimizadas. Além disso, impede a convergência para soluções semelhantes. Por outro lado, pode ser difícil evitar os mínimos locais. Reinicializada também faz com que o tempo diminua.



**FIG. 4.5.** Fluxograma do *ARMOGA*.

## 4.6 SUPERFÍCIE DE RESPOSTAS

Em problemas de engenharia onde a função objetivo toma muito tempo de CPU, como por exemplo, no problema de condução de calor multicamadas tratado nesta dissertação, o uso de modelos físicos completos torna-se proibitivo tendo em vista que métodos irão demandar centenas de chamadas ao método de solução do problema físico.

Para contornar estas dificuldades, estudos de otimização baseados em soluções aproximadas são freqüentemente adotados, permitindo que os algoritmos de otimização sejam aplicados em modelos simplificados, de baixo custo computacional. Dentro deste contexto, destacam-se as soluções baseadas em superfície de respostas.

A metodologia da superfície de resposta (RSM) é essencialmente um conjunto de técnicas estatísticas usadas em pesquisas, com a finalidade de determinar as melhores condições e dar maior conhecimento sobre a natureza de certos fenômenos, ou seja, superfícies de respostas consistem em aproximações matemáticas que procuram representar a resposta de um sistema a partir da interpolação e extrapolação de um conjunto de soluções existentes. É composta por planejamento e análise de experimentos, que procura relacionar respostas com os níveis de fatores quantitativos que afetam essas respostas (BOX E DRAPER, 1987). Esse relacionamento entre respostas e níveis de fatores procura, entre outros, atingirem um dos objetivos: estabelecer uma descrição de como uma resposta é afetado por um número de fatores em alguma região de interesse; estudar e explorar a relação entre várias respostas e extremos obrigatórios; localizar e explorar a vizinhança de resposta máxima ou mínima. Por exemplo, o modelo da superfície de resposta quadrática para a variável  $p$  é da forma:

$$y = c_0 + \sum_{1 \leq i \leq p} c_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq p} c_{ij} x_i x_j, \quad (4.3)$$

Onde,  $x_i$  são variáveis,  $c_i$  são os coeficientes do polinômio, e  $y$  é superfície de resposta calculada e a variável  $p$ , (4.3) tem  $n=(p+1)(p+2)/2$  termos. Para cada modelo de superfície de resposta, podem-se estimar os coeficientes do polinômio de maneiras bem distintas (KAUFMAN M. D., 1996).

A maioria aplicações RSM são baseadas em polinômios quadráticos. Embora esses polinômios sejam relativamente fáceis de utilizar, porém algumas questões devem ser consideradas antes de sua execução. Para a variável  $p$ , o número de termos no modelo função,

$n$ , cresce a um ritmo  $O(p^2)$ . Ao Criar uma superfície resposta para o polinômio  $n$ -termo, requer um número de pontos,  $m$ , que é maior do que  $n$ . Isto parece razoável, no entanto, para manter a boa precisão, é necessário minimizar as estimativas do domínio, onde análises foram realizadas. Isto é, a superfície de resposta é construída de acordo com pontos dados, criando um casco convexo, no qual reside a superfície. Diferentes modelos foram incluídos neste trabalho, a fim de otimizar o sistema pipe-in-pipe.

Devido às propriedades termofísicas de um material isolante escolhido, a solução numérica teve um custo computacional muito grande, por isso, foram realizadas pesquisas entre as superfícies de respostas para encontrar a superfície que apresenta o menor erro entre os resultados virtuais gerado pelas superfícies de resposta e os resultados reais gerados pelo programa feito em Fortran para o problema de condução de calor multicamadas com geração de calor.

#### 4.7 A PROGRAMAÇÃO FEITA NO SOFTWARE MODEFRONTIER®

A implementação feita no software modeFrontier, mostrado na figura 4.6, é definida na figura como variáveis. Os parâmetros das variáveis de entrada da esquerda, ou seja, as variáveis que são otimizadas, são estas: a espessura da camada isolante, a posição e a potência dos cinco aquecedores elétricos de 3.175 mm de espessura e 50 mm de largura. A figura do quadrado, que tem o nome de espessura, representa a espessura da camada isolante que varia de 25 mm a 100 mm. Os ângulos dos aquecedores são dados por  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$  e  $t_5$  na figura abaixo, onde variam de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ . A potência desses aquecedores é representada por  $g_1$ ,  $g_2$ ,  $g_3$ ,  $g_4$  e  $g_5$ , variando de 0 kW a 250 kW.

A figura de um quadrado todo preto representa o programa feito em fortran90 que resolve o problema de condução de calor com múltiplas camadas e com geração de calor.

A variável de saída da temperatura mínima do óleo é representada por  $t_{min}$ ; o custo de instalação é definido como CI, já o custo de operação é chamado por CO. O  $minTaceitavel$  significa a restrição imposta ao problema, em que a temperatura do óleo não pode ficar abaixo de  $30^\circ\text{C}$ .

Nota-se que foram considerados dois tipos de custos: o custo de instalação e o custo de operação. O objetivo, portanto, era de minimizar os custos e maximizar a temperatura do

fluido, com o intuito de evitar a formação de hidratos e deposição de parafinas na tubulação. A expressão para o custo de instalação é dada como:

$$CI = L * \left[ \pi * (r_{ext}^2 - r_{int}^2) \right] * (\text{preço por m}^2 \text{ do material isolante}). \quad (4.4)$$

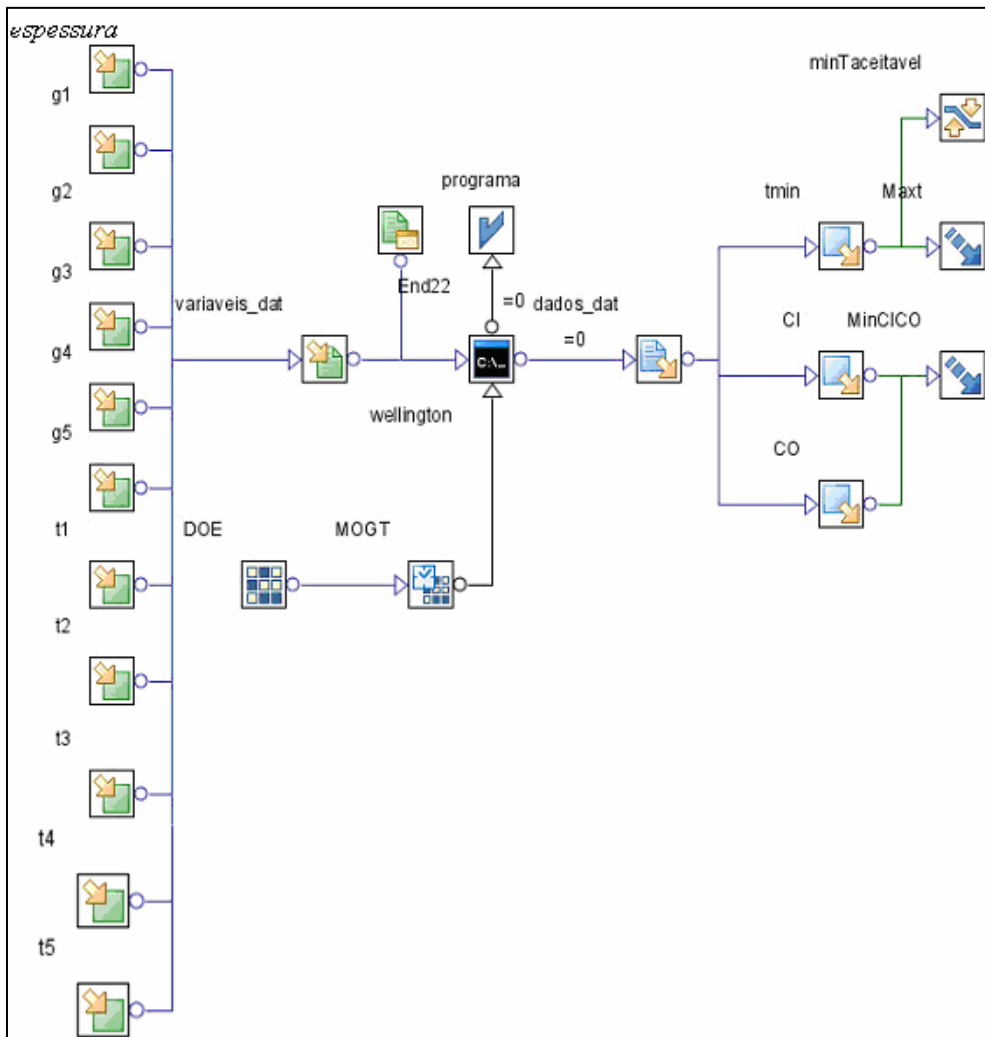
Onde,  $r_{ext}$  e  $r_{int}$  são os raios externos e internos da camada isolante e  $L$  é o comprimento do duto, que nesse trabalho foi considerado igual a 5 km. Para o preço por  $m^2$  do material isolante, foi feita uma função linear para esse material, em que temos uma variação da espessura do material isolante de 0.025 m para 0.1 m.

Observe que apenas o custo associado com a compra do isolante foi considerado. O custo associado com os aquecedores elétricos é dado por:

$$CO = (q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5) * (\text{custo por watts/horas}) * 8 \text{ horas} \quad (4.5)$$

Onde  $q_i$  é a potência de cada um dos cinco aquecedores a serem considerados. Tais custos representam à quantidade de energia utilizada para ativar cada um das cinco resistências elétricas durante um período de 8 horas. Numa primeira aproximação, considerou - se que os aquecedores estão continuamente ligados. Nesse trabalho, o custo por watts/hora foi tomado igual a 0,00032.

As funções objetivas são representadas por  $Max_t$ , que significam minimizar um sobre temperatura (1/tmin) do petróleo e  $minCICO$  que minimiza a soma dos *custo de instalação* e do *custo de operação*.



**FIG. 4.6** - Programação no ModeFRONTIER®

## **CAPÍTULO 5**

### **5 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir das formulações apresentadas nos Capítulos 3 e 4, com a finalidade de encontrar um conjunto de soluções de Pareto para uma parada de produção durante oito horas. Inicialmente, serão apresentados os resultados obtidos na validação da solução numérica para o problema de condução de calor em coordenadas cilíndricas sem e com termo fonte. Na seqüência, os resultados gerados pela otimização do sistema pipe-in-pipe com aquecimento elétrico ativo, três tipos de materiais isolantes serão utilizados no PIP para a otimização do problema proposto. Para cada material isolante, serão empregados três métodos de otimização multi-objetivo, no qual teremos como comparar os resultados obtidos entre os métodos de otimização e também entre os materiais isolantes.

#### **5.1 CONDUÇÃO DE CALOR EM MULTICAMADAS**

A solução numérica proposta para o modelo matemático foi implementada em um programa de computador em Fortran90. Todos os aspectos descritos no Capítulo 3 foram incluídos na implementação computacional; no entanto, serão apresentados inicialmente os resultados de uma tubulação simples, onde o óleo se encontra parado e o duto é considerado infinito na direção  $z$ , na qual a temperatura varia com o raio e com o tempo com troca de calor por convecção no meio externo.

##### **5.1.1 PROBLEMA DE CONDUÇÃO DE CALOR COM DUAS CAMADAS**

Dando continuidade a pesquisa, neste momento será determinada a distribuição da temperatura em um tubo composto por duas camadas com contato térmico perfeito na interface, no qual as propriedades termofísicas utilizadas foram: condutividade térmica do

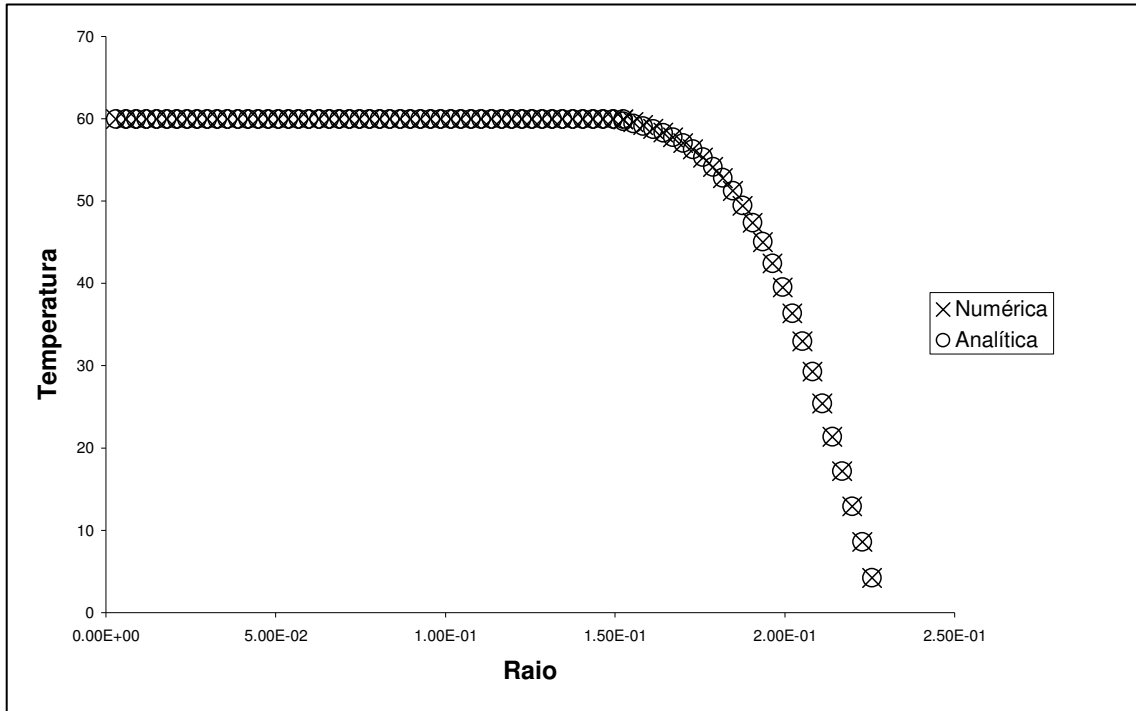


tubo interno ( $k_1$ ) igual a  $54 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ , a condutividade térmica para o tubo externo ( $k_2$ ) igual a  $0.17 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ , a difusividade térmica interna ( $\alpha_1$ ) igual a  $0.0000001 \text{ m}^2/\text{s}$ , já a difusividade térmica externa ( $\alpha_2$ ) é igual a  $0.0000141 \text{ m}^2/\text{s}$ , sendo o coeficiente de convecção externa ( $h$ ) igual a  $1000 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ , onde, a dedução do coeficiente de convecção utilizado nesse trabalho, pode ser encontrado no apêndice I. As espessuras utilizadas foram  $0.1524$  metros para a camada de aço e  $0.0762$  metros para a camada de polipropileno. A temperatura da água do mar circunvizinha é assumida igual a  $4^\circ\text{C}$  e a temperatura inicial é igual a  $60^\circ\text{C}$ .

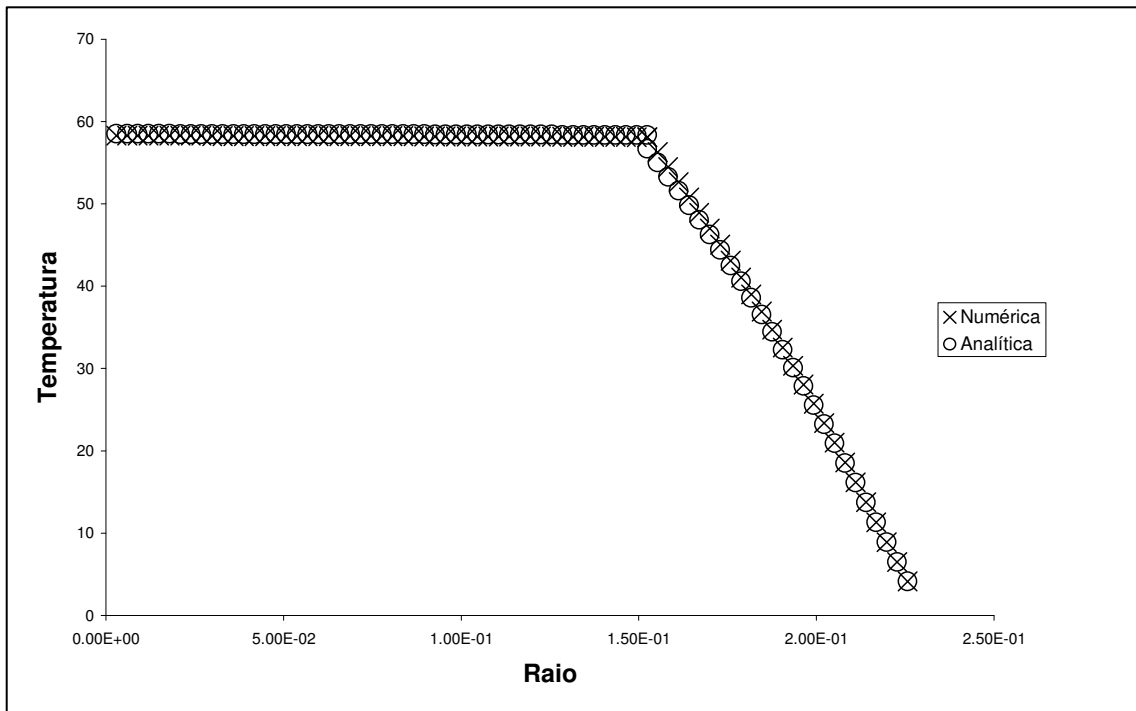
Ao observar a figura 5.1, nota-se que a solução apresenta uma pequena descontinuidade na fronteira entre os materiais utilizados. Essa descontinuidade fica mais acentuada, nas figuras 5.2, 5.3 e 5.4. Nota-se também, que essa descontinuidade vai ficando mais evidente com o passar do tempo, pois, para a distribuição da temperatura em uma hora, não há nenhuma descontinuidade, contudo em três horas a descontinuidade já começa a ser capturada.

Na tabela 5.1 foram apresentados os valores das temperaturas em uma posição escolhida de forma aleatória. Nota-se que com o aumento do tempo, o erro percentual também aumenta, mesmo assim o erro não chega a  $6\%$  para nenhuma das malhas, mais quanto maior o refinamento da malha, melhor é a aproximação da solução numérica com a analítica. Nesta tabela, também é mostrado o erro percentual, que diminui de acordo com o refinamento da malha.

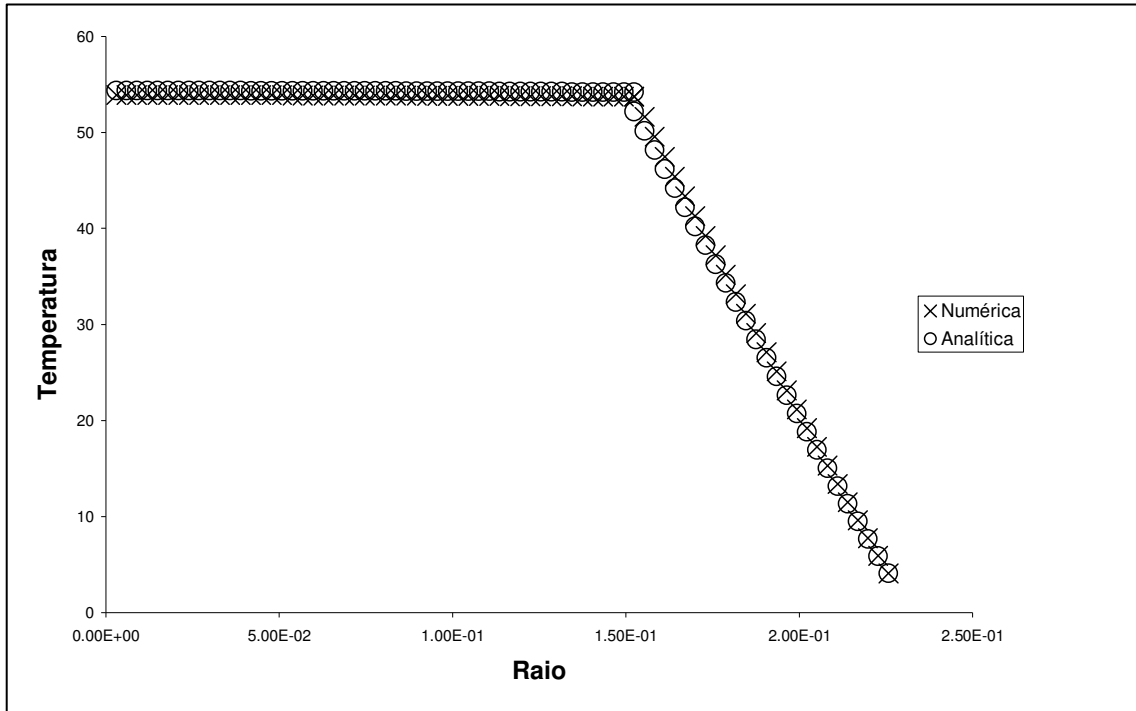
O número de autovalores é determinado por um critério de convergência da temperatura, onde os erros são dados pela diferença da temperatura e de fluxo na fronteira das camadas, sejam menores que uma tolerância de  $0.0001$ . Nota-se que o número de autovalores utilizados diminuiu com o aumento do tempo na solução analítica, uma vez que com o aumento do tempo a exponencial tende a zero mais rápido.



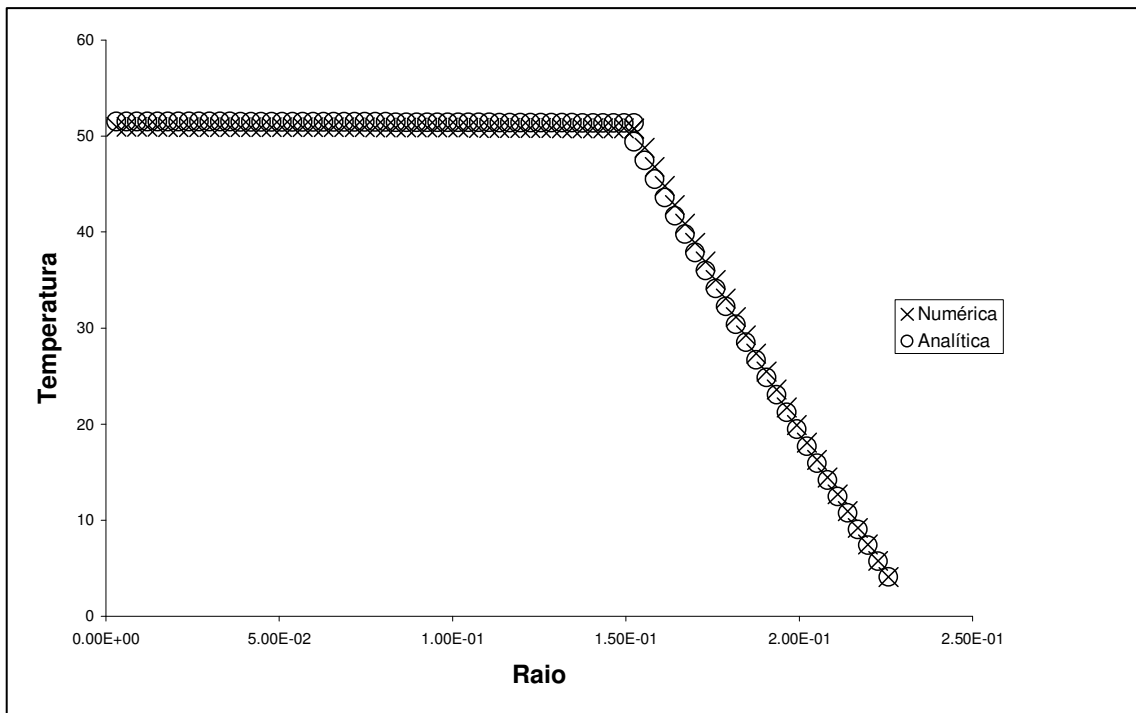
**FIG. 5.1** Comparação da solução analítica e numérica para um tubo composto por duas camadas no tempo igual a 1 (uma) hora.



**FIG. 5.2** Comparação da solução analítica e numérica para um tubo composto por duas camadas no tempo igual a 3 (três) horas.



**FIG.5.3** Comparação da solução analítica e numérica para um tubo composto por duas camadas no tempo igual a 6 (seis) hora.



**FIG. 5.4** Comparação da solução analítica e numérica para um tubo composto por duas camadas no tempo igual a 8 (oito) horas.

**TAB. 5.1** Tabelas convergência do tempo e da malha do tubo com duas camadas.

Posição	Valor de N	Tempo	Solução numérica	Solução Analítica	Autovalores	Erro%
0.169985	78	1 hora	57.06374889	57.05132895	6	0.02176977
0.169985	78	3 horas	46.98886155	46.25991699	4	1.57575847
0.169985	78	6 horas	41.29342331	40.22159936	3	2.66479696
0.169985	78	8 horas	38.89751115	37.88293578	3	2.67818572

Posição	Valor de N	Tempo	Solução numérica	Solução Analítica	Autovalores	Erro%
0.169985	38	1 hora	56.24985694	56.25369794	6	0.006828
0.169985	38	3 horas	45.86234223	44.41166229	4	3.26643919
0.169985	38	6 horas	40.34793633	38.24805439	3	5.49016669
0.169985	38	8 horas	37.96674969	35.99374566	3	5.48151906

### 5.1.2 PROBLEMA DE CONDUÇÃO DE CALOR COM N CAMADAS

Agora, entrando no problema de condução de calor com N camadas, foram utilizados um tubo interno tinha 6 polegadas de diâmetro(0.1524 m), a espessuras das camadas isolantes são iguais 0.05 metros, para a validação da solução numérica para o problema de condução de calor em multicamadas , onde a variação da temperatura se dá em relação ao raio, ângulo e tempo. A tabela 5.2 apresenta a espessura da camada de aço interno ( $\delta_1$ ), a espessura da camada de aço externa ( $\delta_2$ ) e o comprimento do tubo (L). As tabelas 5.3 mostram as propriedades termofísicas dos materiais utilizados nesse trabalho. O valor da difusividade térmica da lã mineral utilizada nesse trabalho é um dado aproximado. Devido à dificuldade de encontrar as propriedades termofísicas desse material.

As figuras 5.5 a 5.8, apresentam a comparação entre a solução numérica 1D (solução referente a equação da condução de calor em coordenadas cilíndricas, no qual a temperatura varia com o raio e com o tempo) com a solução numérica 2D (solução referente a equação da condução de calor em coordenadas cilíndricas, no qual a temperatura varia com o raio, ângulo e com o tempo). O comportamento da distribuição da temperatura do óleo durante uma parada de produção de oito horas, no qual a solução numérica 2D foi utilizado dois  $dt$  diferentes. Um  $dt$  com o mesmo valor utilizado na solução 1D e o outro  $dt$  cinquenta vezes maior que a

solução numérica 1D e duzentas vezes maiores, que o permitido pelo critério de estabilidade do Método Explícito, com o objetivo de avaliar a influencia do  $dt$  na solução do problema e com isso minimizar o tempo de execução do programa, como a soluções numéricas 2D com  $dt = 0.1$  e  $dt = 5.0$ ; com ambas soluções apresentando um erro menor que 2%.

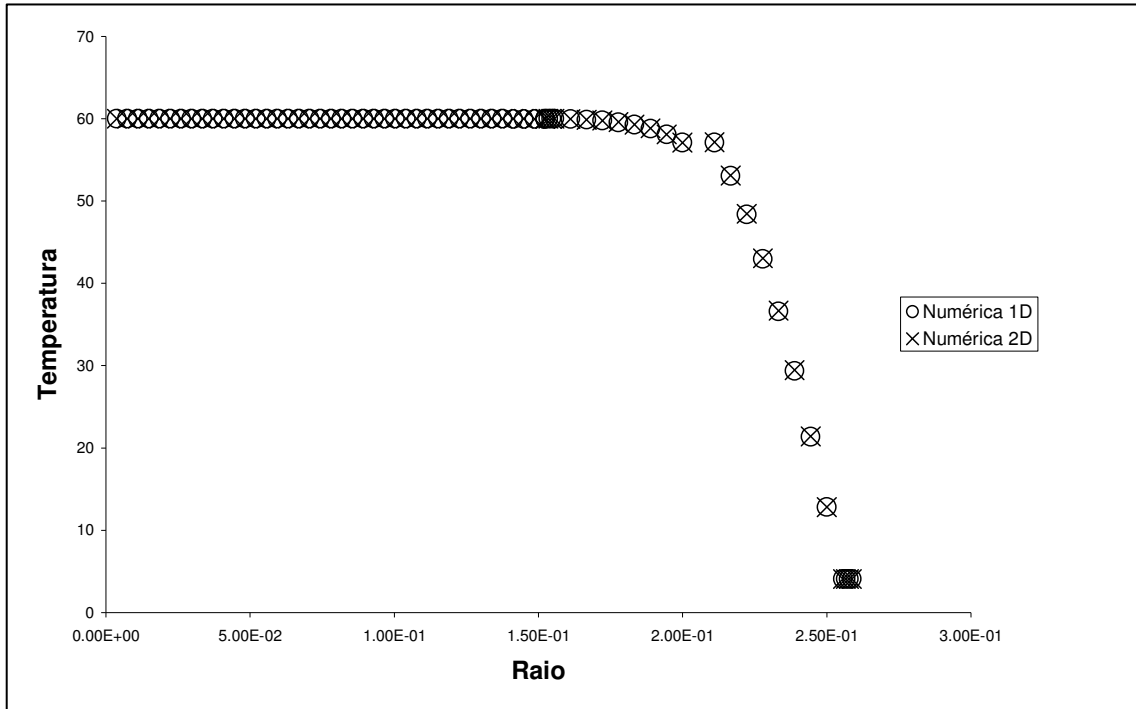
Portanto, nota-se que as duas soluções numéricas 2D são satisfatórias, mas para a tarefa de otimização foi escolhida a Solução Numérica 2D com  $dt = 5.0$ , pois para esse problema o uso desse  $dt$  cinquenta vezes maior reduziu o tempo de execução do programa, para aproximadamente três minutos, enquanto para a outra solução numérica com  $dt=0.1$ , o tempo de execução é de aproximadamente vinte minutos, ganhando-se tempo para a tarefa de otimização. De acordo com os resultados acima apresentados, tem-se a figura 5.8.

**TAB. 5.2.** Propriedades geométricas do Pipe-in-Pipe.

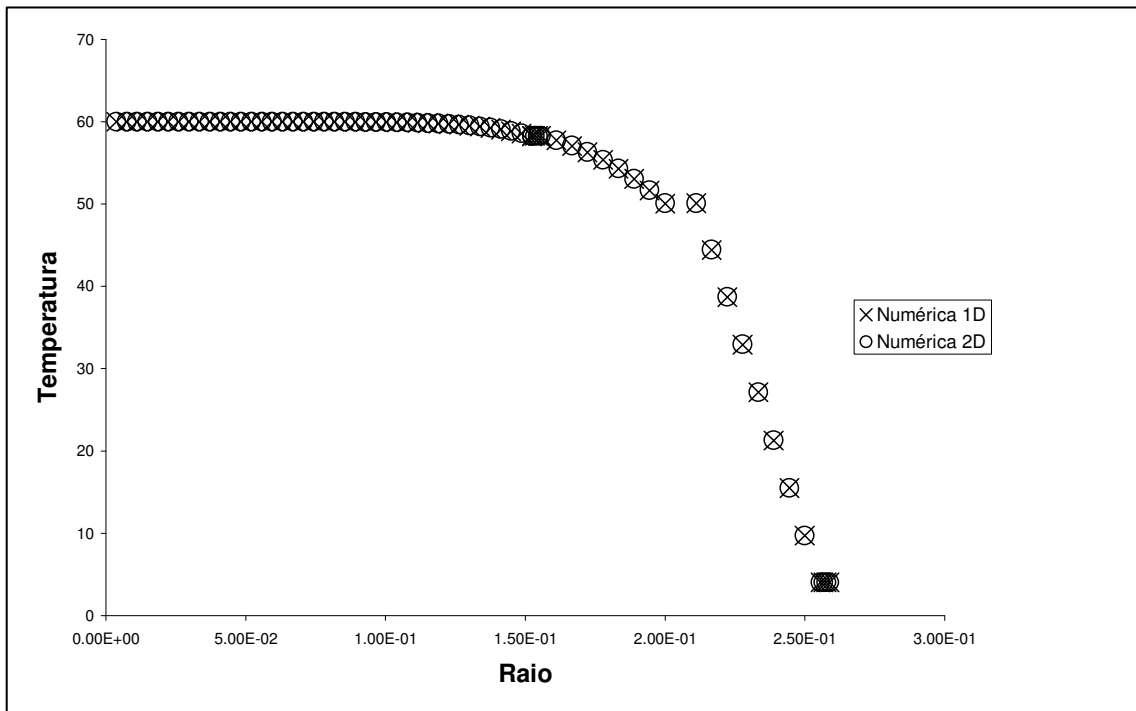
$\delta_1$ <b>mm</b>	$\delta_2$ <b>mm</b>	<b>L</b> <b>Km</b>
3.175	3.175	5.0

**TAB. 5.3.** Propriedades termofísicas do Pipe-in-Pipe

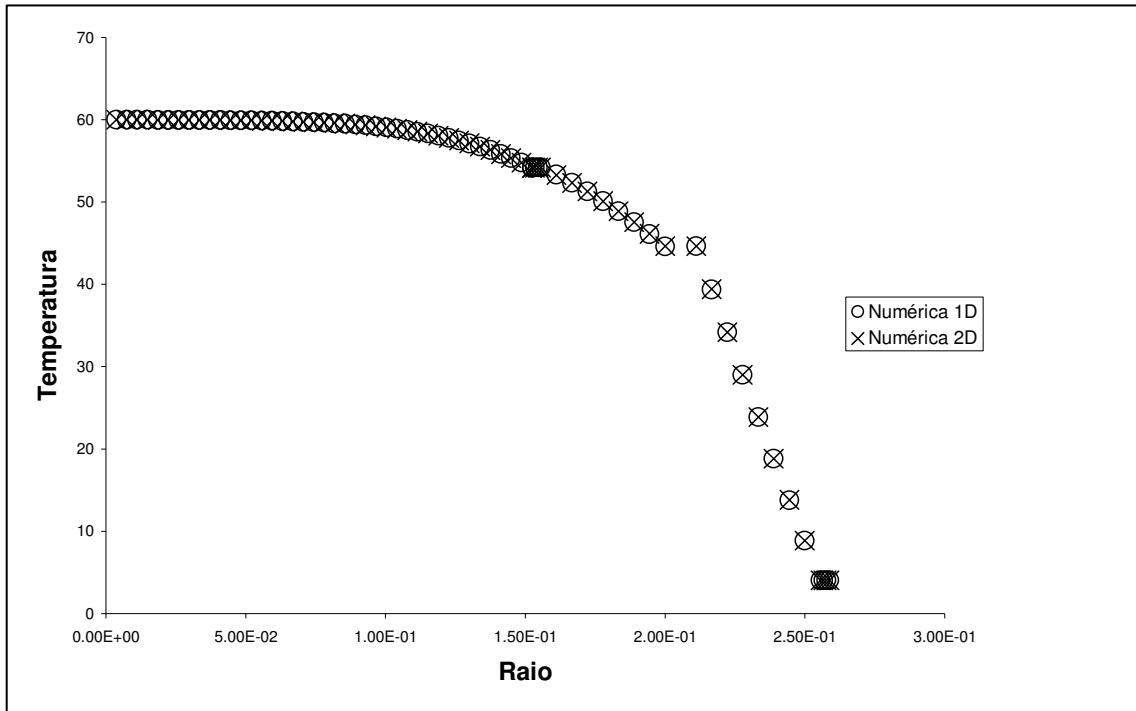
<b>Material</b>	$\alpha$ $m^2 / s$	<b>K</b> <b>W/m °C</b>
aço	$1.41 \times 10^{-5}$	54.0
Polipropileno	$1.0 \times 10^{-7}$	0.17
Lã mineral	$1.0 \times 10^{-7}$	0.05



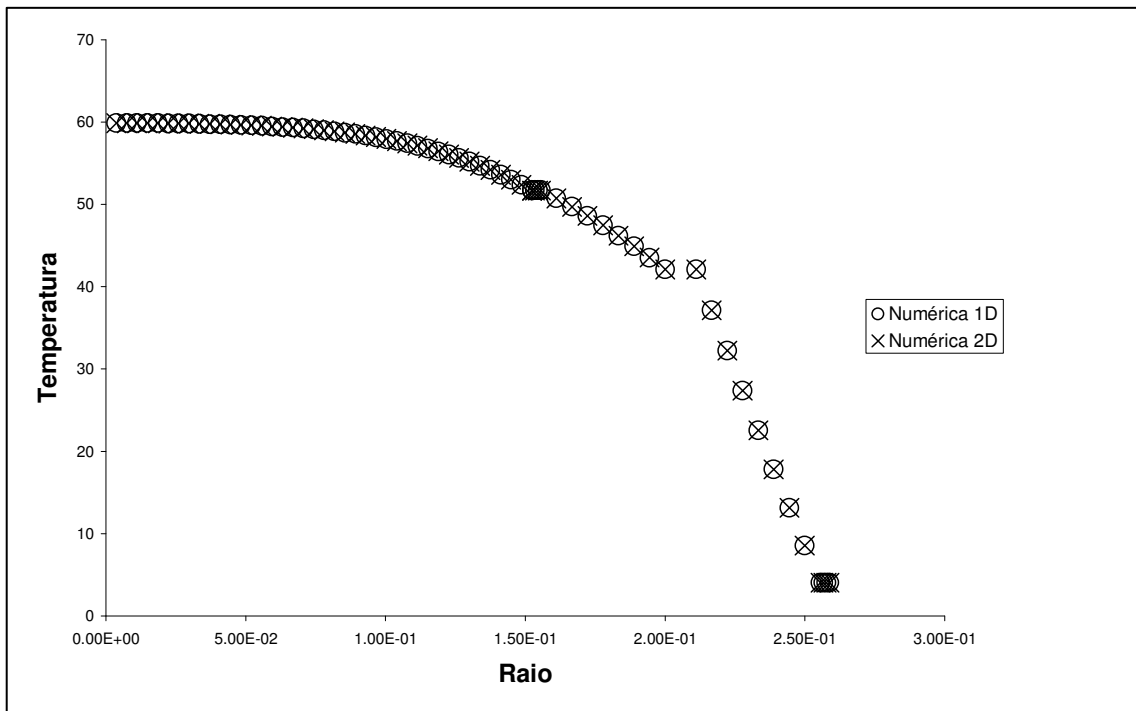
**FIG. 5.5** Comparação da solução numérica 1D e numérica 2D para um tubo composto por cinco camadas no tempo igual a 1 (uma) hora.



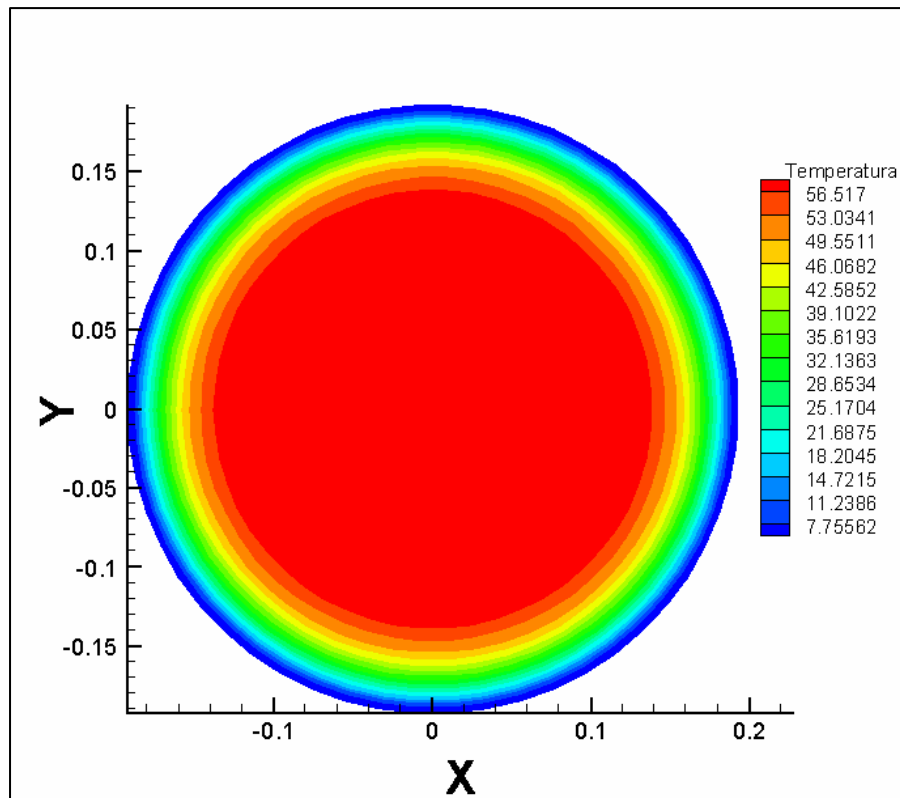
**FIG. 5.6** Comparação da solução numérica 1D e numérica 2D para um tubo composto por cinco camadas no tempo igual a 3 (três) horas.



**FIG. 5.7** Comparação da solução numérica 1D e numérica 2D para um tubo composto por cinco camadas no tempo igual a 6 hora.



**FIG.5.8** Comparação da solução numérica 1D e numérica 2D para um tubo composto por cinco camadas no tempo igual a 8 hora.



**FIG. 5.9.** Pipe-in-pipe sem aquecimento ativo.

### Comentários

Como foi possível observar, a validação para o problema de condução de calor em multicamadas entre a solução 2D e a solução 1D pode ser feita da forma acima apresentada porque não há termo fonte, com isso o fluxo de calor é contínuo em todo o tubo. O objetivo de utilizar um  $dt$  tão grande é diminuir o tempo de otimização do problema de condução de calor com geração de calor, já que para gerar uma fronteira de Pareto os métodos de otimização executam o programa centenas ou até milhares de vezes.

### 5.1.3 PROBLEMA DE CONDUÇÃO DE CALOR COM N CAMADAS COM AQUECIMENTO ATIVO

Para a validação da solução numérica no problema de condução de calor com N camadas com aquecimento ativo, onde a temperatura varia em função do raio, ângulo e tempo, foi feita



a comparação com a solução analítica para um tubo simples com termo fonte, utilizando o método de *transformada integral*.

A figura 5.10 apresenta uma mudança para o ângulo de graus para radiano, com o objetivo de comparar as duas soluções. Nessa figura, o pipe-in-pipe com aquecimento ativo era composto apenas pelo aço, com uma geração de calor de  $100000 \text{ (W/m}^3\text{)}$ , para observar o comportamento das soluções. Nessa validação, foi utilizado um duto com um raio de 0.20874 metros com o mesmo valor do coeficiente de transferência de calor por convecção. A figura mostra um desvio na temperatura em alguns locais. Esses desvios são proporcionados pelos aquecedores elétricos. Isso mostra que o fluxo de calor nessas regiões é diferente dos demais locais. Com o objetivo de explicar melhor a influência dos aquecedores elétricos, tem-se a figura 5.10 que mostra perfeitamente a influência desses aquecedores elétricos e o aumento da temperatura nos locais onde se encontra esses aquecedores, podendo-se observar que a temperatura teve um aumento se comparado com a figura 5.9, que não apresenta aquecimento ativo. Porém, na figura 5.11 tem-se um pipe-in-pipe com quatro camadas, sendo composta, por óleo, aço, polipropileno e aço. Onde, a espessura do polipropileno é 0.05 metros e com uma potência de  $250000 \text{ (W/m}^3\text{)}$  para os cinco aquecedores elétricos de 3.175 mm de espessura e 50 mm de largura.

O erro entre a solução analítica e a numérica é inferior a 7%. Esse erro poderia ser menor se diminuíssemos o  $dt$ ; no entanto, o valor escolhido para o  $dt$  foi alto. Porém, para os padrões de engenharia, um erro inferior a 7% é considerado aceitável para esse problema.

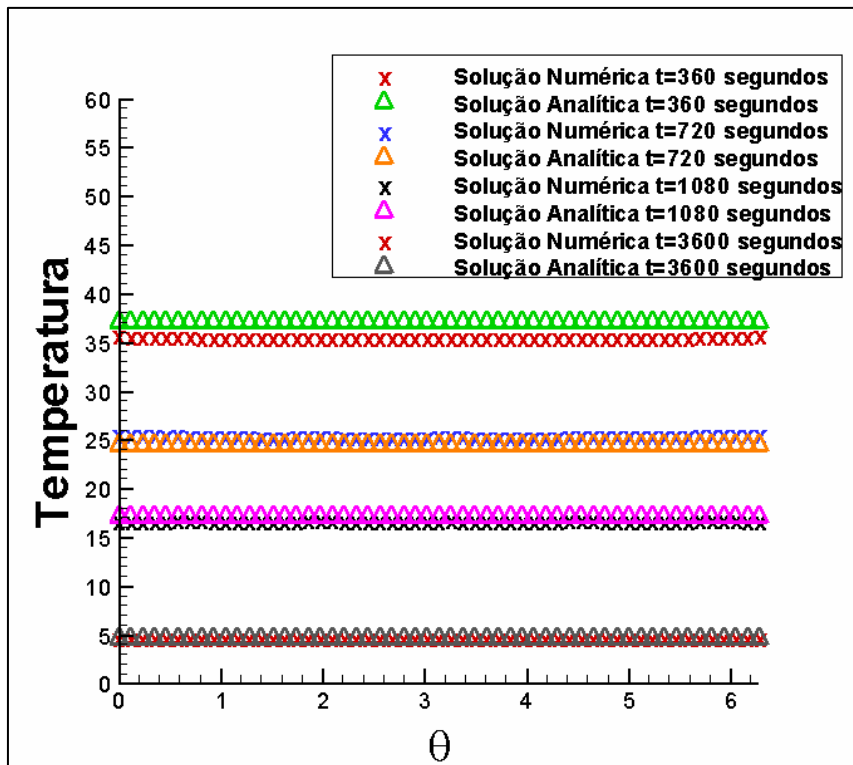


FIG. 5.10. Comparação entre a solução analítica com a solução numérica para um tubo com N camadas com aquecimento ativo elétrico.

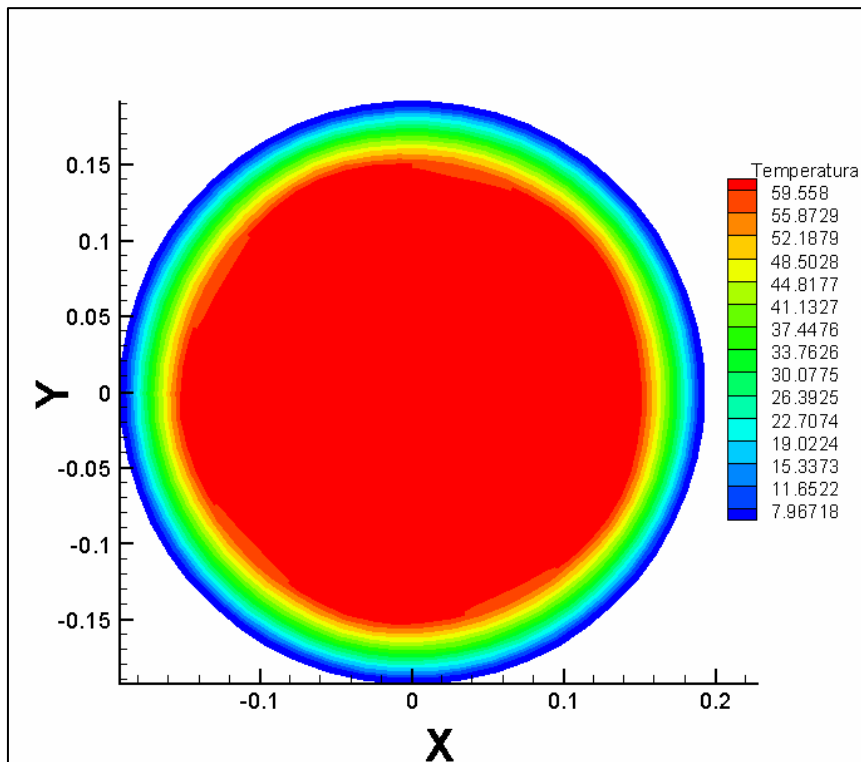


FIG. 5.11. Pipe-in-pipe com aquecimento ativo em um tempo de 1 (uma) hora.

## 5.2 OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA PIPE-IN-PIPE COM AQUECIMENTO ELÉTRICO ATIVO

Nesta seção, serão apresentados os resultados encontrados pela otimização do sistema pipe-in-pipe com aquecimento elétrico ativo na parede, na qual serão analisados os métodos de otimização descritos no capítulo 4; porém, com diferentes tipos de materiais isolantes. Também será discutido a relação de correlação existente para cada variável de entrada em relação às variáveis de saída envolvidas nesse processo de otimização.

Foram utilizados três métodos de otimização para otimizar a espessura da camada isolante, a posição e a intensidade dos cinco aquecedores elétricos. Para a otimização da camada isolante foram usados dois tipos de materiais isolantes: o polipropileno e a lã mineral; logo em seguida foi feita uma mistura desses materiais com o objetivo de minimizar o custo de instalação.

### 5.2.1 DADOS DO POLIPROPILENO

#### 5.2.1.1 MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVO O MOGT

Neste ponto, analisa-se a otimização do sistema pipe-in-pipe com aquecimento elétrico ativo na parede, o qual será utilizado o método da Teoria dos jogos Multi-Objetivo e o polipropileno como material isolante.

A tabela 5.4 tem onze colunas e quinze linhas. Cada coluna representa uma variável que foi otimizada e os valores encontrados. Na primeira coluna, têm-se as espessuras encontradas para a camada isolante, da segunda a sexta, tem-se o valor da potencia aplicada no pipe-in-pipe de cada um dos cinco aquecedores elétricos e da sétima até a décima primeira coluna tem-se a posição que se encontra cada um dos cinco aquecedores no duto. Agora, sabendo o que significada cada coluna, é fácil observar, que cada linha corresponde o valor de cada variável otimizada, gerando os valores da tabela 5.5, onde se tem quatro colunas e cinqüenta linhas.

Observa-se que na tabela 5.5 a primeira coluna representa o custo de instalação do material isolante (*CI*) que varia de acordo com o valor da espessura, já a segunda coluna representa o custo de operação dos aquecedores elétricos (*CO*) que é gerado pela soma das potências dos cinco aquecedores. A terceira representa a temperatura mínima do óleo (*tmin*), onde essa variável seja influenciada por todas as variáveis que foram otimizadas. E a quarta é a soma dos custos.

A tabela 5.4 mostra os valores gerados pelas variáveis otimizadas e a tabela 5.5 os valores dos objetivos. Para obtenção desses valores, conhecidos como soluções não-dominadas ou soluções ótimas, o software modeFrontier® rodou o programa 980 vezes para a otimização do sistema, o que corresponde a 66 horas e 45 minutos, utilizando o MOGT, com diferentes valores para cada variável de entrada. Pode-se observar que, a temperatura do óleo varia de 30°C a 57°C aproximadamente. Respeitando a restrição de 30°C imposta, a soma dos custos varia de 9770.88 a 38475. E com uma potência requerida variando de 669 KW a 965 KW para toda a tubulação de 5 km. Su et al., em 2005 utilizou uma potência de 1.38 MW, para manter a temperatura a 25°C durante a parada de produção.

A figura 5.12 apresenta uma correlação entre as variáveis otimizadas e os objetivos. Nota-se que a espessura tem uma grande influência no custo de instalações (*CI*) e uma influência um pouco menor na temperatura mínima do óleo (*tmin*), de acordo com a tabela mencionada acima. As potências dos aquecedores apresentaram uma pequena correlação para *tmin* de acordo com a figura e as posições desses aquecedores apresentaram uma correlação mediana, devido ao grande número de soluções apresentando a mesma posição, em que estas posições estão situados bem próximos da simetria.

**TAB 5.4.** Variáveis otimizadas pelo MOGT utilizando o polipropileno como material isolante.

Espessura (m)	G1 (W/m <sup>3</sup> )	G2 (W/m <sup>3</sup> )	G3 (W/m <sup>3</sup> )	G4 (W/m <sup>3</sup> )	G5 (W/m <sup>3</sup> )	φ 1 (graus)	φ 2 (graus)	φ 3 (graus)	φ 4 (graus)	φ 5 (graus)
0.1	226003	225886	249895	186414	248080	353	216	65.45	170.2	242.18
0.06	250000	63617	206120	250000	250000	79	6.5	222.5	314.2	144
0.062	246269	37082	216849	249617	237044	79	6.5	235.6	327.3	144
0.062	246269	37082	216849	249617	237044	79	6.5	235.6	327.3	144
0.062	246269	37082	216849	249617	237044	79	6.5	235.6	327.3	144
0.062	245495	37082	219919	249555	232529	79	6.5	235.6	327.3	144
0.061	248135	37082	210516	249809	243522	79	6.5	235.6	327.3	144
0.062	245273	37082	219583	249626	233428	79	6.5	235.6	327.3	144
0.061	248135	37082	211485	249809	243522	79	6.5	235.6	320.7	144

0.041	249597	181573	217923	247026	249070	144	6.5	58.91	301.1	202.91
0.04	249291	187591	217113	246964	240388	242	39	124.4	301.1	196.36
0.04	249305	193927	217336	246964	239437	242	39	124.4	301.1	202.91
0.04	249402	198351	217057	246964	243575	242	39	124.4	301.1	196.36
0.04	249318	196635	217325	246964	240954	242	39	124.4	301.1	196.36
0.098	249402	199379	217055	38124	243575	65	39	288	261.8	196.36
0.041	249484	224839	246648	250000	245787	268	46	111.3	340.4	183.27
0.044	249484	202565	221299	238289	245787	236	46	98.18	314.2	196.36
0.045	249484	205225	223385	233884	245787	242	46	98.18	314.2	196.36
0.044	249484	204495	224406	236856	245787	236	46	98.18	320.7	196.36
0.045	249484	209372	226249	234295	245787	242	46	98.18	320.7	196.36
0.046	249484	211151	229709	229503	245787	249	46	98.18	320.7	196.36
0.046	249484	221546	240149	226315	245787	262	46	111.3	327.3	189.82
0.051	249484	237234	248418	203927	245787	288	46	104.7	320.7	196.36
0.052	249484	236178	244231	200332	245787	288	46	111.3	333.8	196.36
0.052	249484	237594	247824	201204	245787	295	46	111.3	320.7	196.36
0.055	249484	247294	250000	189945	245787	301	46	104.7	320.7	196.36
0.056	249484	238743	242298	184516	245787	295	46	104.7	314.2	202.91
0.049	249484	233898	245478	212754	245787	281	46	117.8	333.8	189.82
0.053	249484	232852	242029	196248	245787	281	46	104.7	314.2	196.36
0.057	249484	236036	240631	180748	245787	288	46	104.7	314.2	202.91
0.058	249484	235683	235214	175153	245787	288	46	111.3	320.7	209.45
0.061	249484	234820	227821	162957	245787	288	46	117.8	327.3	216
0.058	249484	250000	244638	177093	245787	308	46	111.3	333.8	202.91
0.067	249484	250000	228699	139342	245787	308	46	117.8	333.8	222.55
0.063	249484	242051	228681	156030	245787	295	46	124.4	346.9	216
0.067	249484	247556	228260	136430	245787	308	46	124.4	340.4	229.09
0.07	249484	250000	222489	125186	245787	314	46	130.9	353.5	235.64
0.076	249484	250000	215217	102519	245787	327	46	144	360	248.73
0.073	249484	238919	209496	113367	245787	301	46	144	360	242.18
0.088	249484	250000	205196	51967	245787	334	46	157.1	360	274.91
0.078	249484	250000	216097	94625	245787	327	46	150.5	360	255.27
0.082	249484	248236	207337	77362	245787	327	46	157.1	360	268.36
0.08	249484	242871	205914	84712	245787	314	46	150.5	353.5	261.82
0.094	249454	244427	188229	30076	245084	340	46	170.2	360	294.55
0.097	216410	244427	188229	16584	246195	340	46	176.7	360	301.09
0.097	201757	243730	184305	14745	237393	347	98	170.2	360	294.55
0.097	249727	243730	184305	14745	237393	347	98	170.2	360	294.55
0.097	201485	243730	184305	14745	237393	347	46	170.2	360	294.55
0.097	162441	243730	184305	14745	237393	347	52	170.2	360	294.55

**TAB. 5.5.** Objetivos encontrados pelo MOGT utilizando o polipropileno como material isolante.

CI	CO	Tmin (°C)	MinCICO
35565.84	2908.85	57.32	38474.7
14451.87	2610.53	41.19	17062.4

15212.22	2526.37	42.03	17738.6
15212.22	2526.37	42.03	17738.6
15212.22	2526.37	42.03	17738.6
15343.52	2520.53	42.23	17864
14934.47	2532.00	41.57	17466.5
15259.28	2521.58	42.13	17780.9
14830.65	2534.46	41.54	17365.1
7035.30	2931.69	31.36	9966.98
6849.05	2921.83	30.51	9770.88
6849.05	2936.27	30.53	9785.32
6849.05	2957.70	30.80	9806.75
6849.05	2947.02	30.75	9796.07
34432.69	2425.69	53.09	36858.4
7091.75	3114.91	33.55	10206.7
8087.27	2963.02	34.12	11050.3
8439.99	2963.89	34.50	11403.9
8244.78	2972.26	34.47	11217
8452.55	2982.89	34.61	11435.4
8892.70	2984.01	35.18	11876.7
8872.36	3029.20	37.53	11901.6
10884.40	3033.22	38.57	13917.6
11137.13	3010.59	39.35	14147.7
11022.46	3025.61	39.04	14048.1
12177.94	3027.20	39.77	15205.1
12630.10	2971.72	39.81	15601.8
10047.41	3039.74	37.89	13087.2
11561.04	2985.98	39.46	14547
13009.28	2950.89	40.36	15960.2
13474.96	2921.75	40.75	16396.7
14624.45	2869.43	41.87	17493.9
13462.48	2987.52	41.03	16450
17260.87	2850.07	43.61	20110.9
15467.63	2872.40	43.53	18340
17461.32	2835.25	43.76	20296.6
18663.97	2797.95	44.64	21461.9
21170.86	2721.31	46.36	23892.2
19953.21	2706.07	46.24	22659.3
27929.23	2566.24	49.51	30495.5
22230.00	2703.35	47.31	24933.4
24188.89	2632.22	47.94	26821.1
23266.80	2633.63	47.53	25900.4
31104.53	2450.60	49.95	33555.1
33213.49	2334.34	50.03	35547.8
33359.93	2257.75	50.82	35617.7
33359.93	2380.56	51.07	35740.5

33359.93	2257.04	50.17	35617
33359.93	2157.09	50.01	35517

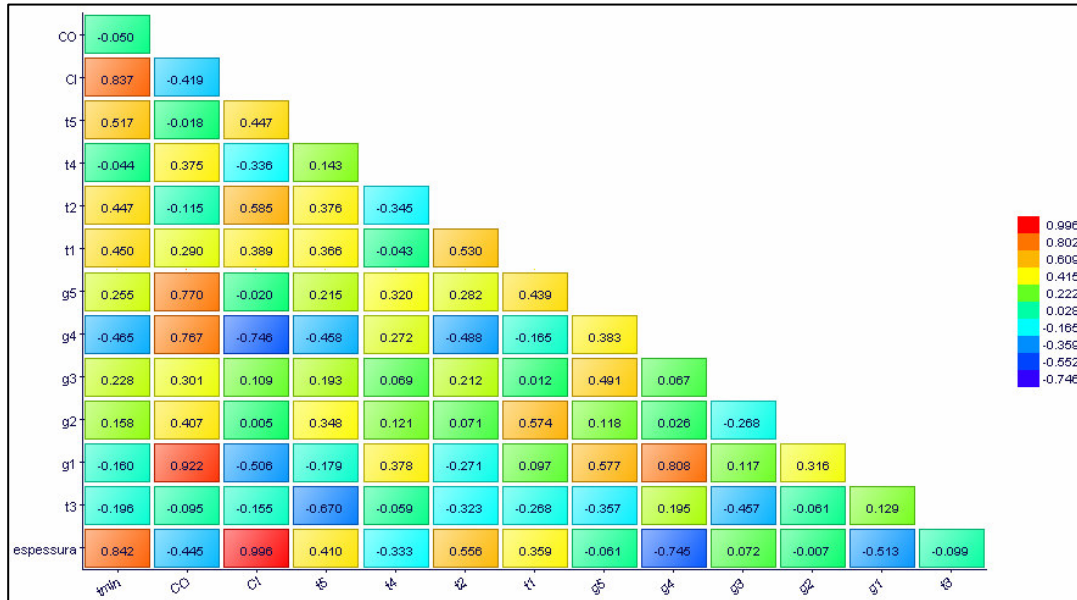


FIG. 5.12. Matriz de correlação entre as variáveis que foram utilizadas na otimização feita pelo MOGT utilizando o polipropileno como material isolante.

### 5.2.1.2 MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVOS O MOSA

Neste momento, a otimização do sistema pipe-in-pipe com aquecimento elétrico ativo na parede será feita pelo método Multi Objective Simulated Annealing e o polipropileno como material isolante.

A tabela 5.6 mostra os valores gerados pelas variáveis otimizadas e a tabela 5.7 apresenta os valores da função objetivo. Para conseguir os valores conhecidos como soluções não-dominadas ou como melhores soluções, o software modeFrontier® rodou o programa 2484 vezes, o que correspondente a 169 horas e 11 minutos , podendo observar que a temperatura do óleo varia de 32.2°C a 50.88°C, aproximadamente, respeitando a restrição de 30°C imposta no software, minCICO 11760.77 a 33079.41. E com uma potência requerida variando de 493 KW a 771 KW para toda a tubulação de 5 km. Observando as tabelas geradas pelo MOSA já se tem um número menor de soluções do que o MOGT, porém, obtém-se uma menor potencia dos aquecedores elétricos e, com isso, um menor custo operacional.

A figura 5.13, mostra que os aquecedores apresentam uma maior influencia em  $t_{min}$  e a espessura continua apresentando uma grande correlação para esse objetivo, maior do que apresentado pelo método MOGT. Em relação, as potências dos aquecedores e a posição o MOSA apresenta uma menor correlação entre os aquecedores para temperatura do óleo, em relação ao MOGT.

**TAB. 5.6** Variáveis otimizadas pelo MOSA utilizando o polipropileno como material isolante.

Espessura (m)	G1 (W/m <sup>3</sup> )	G2 (W/m <sup>3</sup> )	G3 (W/m <sup>3</sup> )	G4 (W/m <sup>3</sup> )	G5 (W/m <sup>3</sup> )	φ1 (graus)	φ2 (graus)	φ3 (graus)	φ4 (graus)	φ5 (graus)
0.068	191406	230469	160156	113281	152344	85	334	202.9	255.3	144
0.047	214844	97656	214844	230469	175781	236	164	32.73	65.45	360
0.06	204452	195058	211225	31451	210382	223	105	6.545	288	32.73
0.077	100279	126010	150546	243366	121548	321	255	144	39.27	170.2
0.078	127949	248900	217160	200355	224774	144	59	307.6	124.4	261.8
0.084	130133	208147	208696	211450	191699	190	65	327.3	124.4	235.6
0.055	189412	122932	58759	182789	68413	295	170	202.9	85.09	19.64
0.056	210109	78312	128795	158690	209412	105	131	202.9	52.36	294.5
0.064	228135	176368	118034	184909	191545	268	196	307.6	45.82	111.3
0.096	174109	113622	226292	231807	226361	59	249	314.2	144	98.18
0.057	195016	118962	64931	171502	70645	301	177	209.5	78.55	26.18
0.054	129241	130170	201988	218080	149353	20	151	196.4	130.9	307.6
0.084	230569	107754	129686	135615	240994	223	98	183.3	6.545	346.9
0.064	247203	182601	134068	194982	211176	268	196	320.7	39.27	104.7
0.077	27267	247486	241680	118137	224033	72	196	78.55	274.9	314.2
0.054	133791	136691	203192	219877	151634	20	157	196.4	130.9	307.6
0.056	209205	91896	127437	168358	199154	105	131	216	45.82	307.6
0.051	139477	138206	166762	212421	132261	33	170	209.5	104.7	307.6
0.084	209192	69793	190196	246285	238934	327	203	65.45	144	229.1
0.059	23880	170057	223846	218630	249705	85	210	307.6	346.9	150.5
0.053	142001	140452	159309	212711	131395	33	170	209.5	98.18	294.5
0.061	216243	178653	223099	120870	235417	46	282	117.8	222.5	72
0.084	208073	64367	193435	243444	239390	327	203	65.45	144	222.5
0.06	7281.1	166994	238480	205081	236109	105	216	294.5	353.5	124.4
0.075	157868	168457	106872	158119	192736	321	203	242.2	98.18	39.27
0.093	84797	175332	201522	161338	215350	13	164	65.45	353.5	261.8
0.085	204049	66746	198180	242402	240240	327	203	52.36	150.5	222.5
0.068	191406	230469	160156	113281	152344	85	334	202.9	255.3	144
0.047	214844	97656	214844	230469	175781	236	164	32.73	65.45	360
0.06	204452	195058	211225	31451	210382	223	105	6.545	288	32.73
0.077	100279	126010	150546	243366	121548	321	255	144	39.27	170.2
0.078	127949	248900	217160	200355	224774	144	59	307.6	124.4	261.8
0.084	130133	208147	208696	211450	191699	190	65	327.3	124.4	235.6

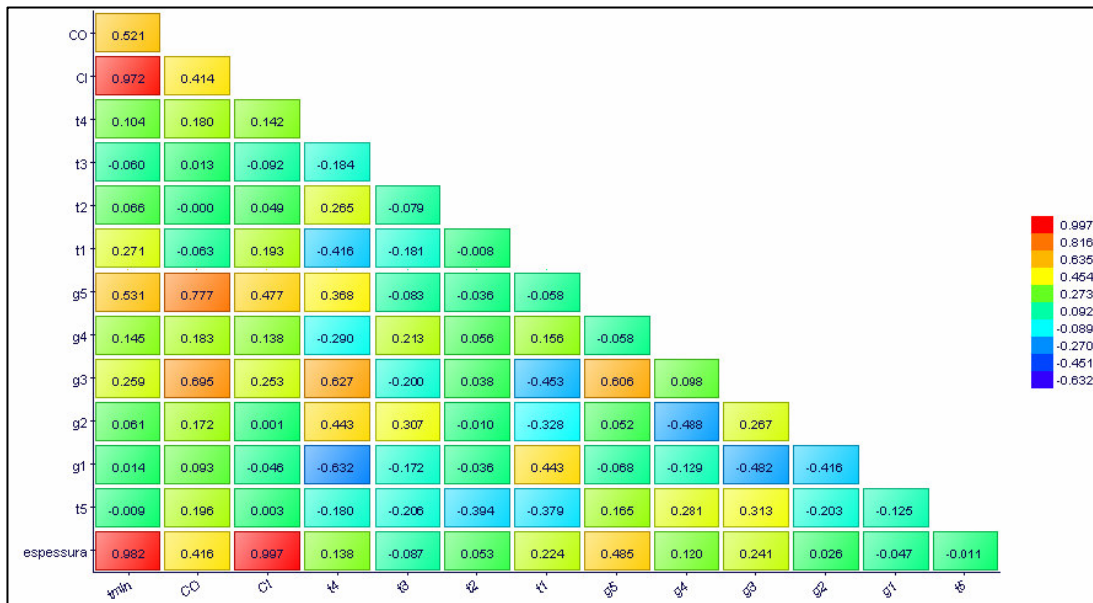


0.055	189412	122932	58759	182789	68413	295	170	202.9	85.09	19.64
0.056	210109	78312	128795	158690	209412	105	131	202.9	52.36	294.5
0.064	228135	176368	118034	184909	191545	268	196	307.6	45.82	111.3
0.096	174109	113622	226292	231807	226361	59	249	314.2	144	98.18
0.057	195016	118962	64931	171502	70645	301	177	209.5	78.55	26.18

**TAB. 5.7** Objetivos encontrados pelo MOGT utilizando o polipropileno como material isolante.

CI	CO	Tmin (°C)	MinCICO
17867.03	2170.01	42.09	20037.04
9370.79	2389.98	30.94	11760.77
14139.00	2182.56	35.94	16321.56
21761.85	1898.91	44.44	23660.76
22190.35	2609.00	46.81	24799.35
25637.35	2432.33	50.36	28069.68
12475.11	1593.09	33.20	14068.20
12911.63	2010.40	35.13	14922.03
15789.96	2301.41	40.74	18091.38
32368.80	2488.81	52.00	34857.61
13165.50	1589.90	34.22	14755.41
11976.65	2121.81	33.70	14098.45
25278.71	2162.23	46.97	27440.94
15846.42	2483.28	41.90	18329.69
21679.74	2198.03	44.88	23877.77
11998.93	2163.66	33.82	14162.59
12833.25	2037.90	35.04	14871.15
10877.15	2020.17	32.39	12897.32
25307.68	2443.27	49.58	27750.95
13757.93	2268.49	35.38	16026.42
11492.12	2011.83	32.91	13503.95
14807.10	2494.16	38.73	17301.25
25270.13	2428.69	49.49	27698.82
14272.10	2186.09	36.88	16458.19
20806.13	2007.19	43.32	22813.33
30933.27	2146.14	50.88	33079.41
26231.41	2436.14	50.67	28667.55
17867.03	2170.01	42.09	20037.04
9370.79	2389.98	30.94	11760.77
14139.00	2182.56	35.94	16321.56
21761.85	1898.91	44.44	23660.76
22190.35	2609.00	46.81	24799.35
25637.35	2432.33	50.36	28069.68
12475.11	1593.09	33.20	14068.20

12911.63	2010.40	35.13	14922.03
15789.96	2301.41	40.74	18091.38
32368.80	2488.81	52.00	34857.61
13165.50	1589.90	34.22	14755.41



**FIG. 5.13** Matriz de correlação entre as variáveis que foram utilizadas na otimização feita pelo MOSA utilizando o polipropileno como material isolante.

### 5.2.1.3 MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVO O ARMOGA

Neste momento, será feita otimização do sistema pipe-in-pipe com aquecimento elétrico ativo na parede, utilizando o método An efficient Multi-Objective Genetic Algorithm e o polipropileno como material isolante.

A tabela 5.8 mostra os valores gerados pelas variáveis otimizadas e a tabela 5.9, os valores da função objetivo pela otimização para conseguir soluções não-dominadas, ou seja, as melhores soluções, o software modeFrontier® rodou o programa 1648 vezes, o que corresponde a 112 horas. Pode-se observar que, a temperatura do óleo varia de 30°C a aproximadamente 56°C, respeitando a restrição de 30°C imposta no software, já a soma dos custos MinCICO apresentam uma variação de 9740.875 a 34227.60. E com uma potência

requerida variando de 770 KW a 982 KW para toda a tubulação de 5 km. O ARMOGA apresentou uma maior potência requerida para os aquecedores elétricos. Por isso, esse método apresenta o maior custo de operação.

A figura 5.14, mostra que a espessura apresenta uma grande correlação para esse objetivo, maior do que dos outros métodos apresentados. Em relação, as potências dos aquecedores e a posição o ARMOGA apresenta uma menor correlação entre os aquecedores para temperatura do óleo, em relação ao MOGT e ao MOSA.

**TAB. 5.8** Variáveis otimizadas pelo ARMOGA utilizando o polipropileno como material isolante.

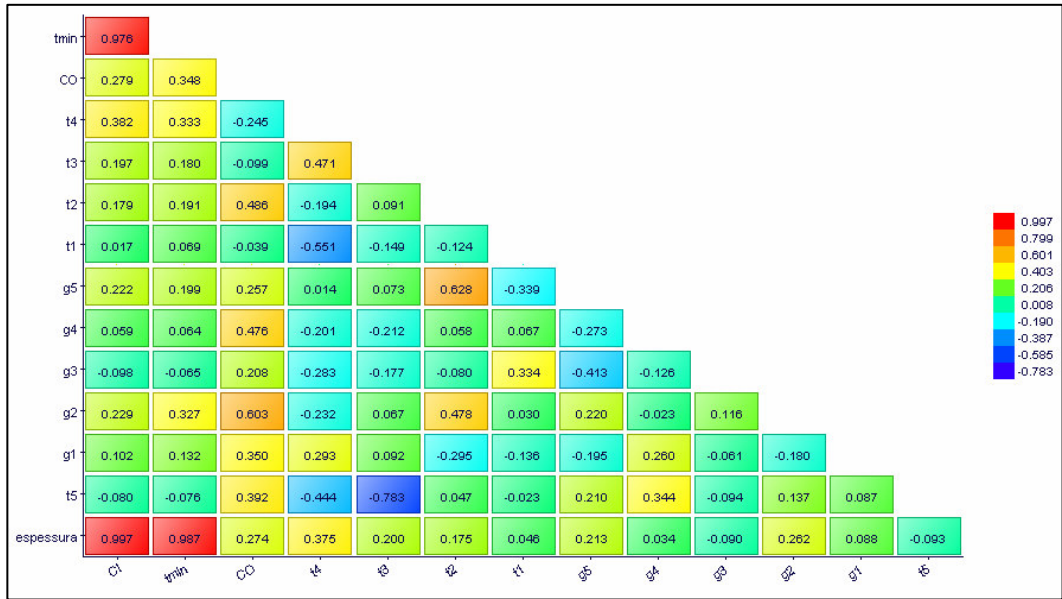
Espessura (m)	G1 (W/m <sup>3</sup> )	G2 (W/m <sup>3</sup> )	G3 (W/m <sup>3</sup> )	G4 (W/m <sup>3</sup> )	G5 (W/m <sup>3</sup> )	φ1 (graus)	φ2 (graus)	φ3 (graus)	φ4 (graus)	φ5 (graus)
0.065	165717	193381	259088	235762	122214	230	48	181	304	78
0.094	230289	228629	149404	296298	291796	63.5	170	285	318	219
0.041	262395	181589	172644	252628	204682	141	212	345	248	38
0.09	223359	287109	218727	151775	264097	60.9	310	233	256	151
0.065	253228	218465	270807	111561	237466	227	116	313	294	90
0.066	263920	200864	208697	194574	204093	338	21	249	153	129
0.057	177536	282143	236375	156396	294591	189	322	293	117	65
0.076	252848	210439	234541	227129	140613	323	28	260	166	102
0.082	227047	285080	218857	281919	226756	332	350	270	124	167
0.084	273935	252164	261637	279942	142818	230	97	332	166	71
0.066	258705	266300	137709	250032	233666	62	201	296	320	157
0.094	269097	102163	185643	221578	251847	188	127	278	345	57
0.047	194706	188522	229502	256383	190356	238	133	121	37	305
0.046	248400	185524	250076	297339	238716	232	305	120	40	255
0.056	147487	214952	203417	229096	220106	228	190	313	106	13
0.051	278829	225398	258858	261714	172777	225	25	295	193	95
0.083	212216	237162	235698	201315	183907	321	120	253	195	38
0.06	251597	213765	174522	255666	206365	131	214	359	266	34
0.046	238091	188349	210054	243789	110087	327	15	266	159	103
0.092	217282	268062	221837	299264	214091	349	258	301	118	147
0.05	222556	237788	221506	235261	251591	227	116	141	40	317
0.067	166365	217014	147391	144202	296239	305	229	350	148	72
0.077	216984	287722	260712	252527	219755	360	315	211	91	148
0.072	226758	222944	179241	294551	253159	333	350	248	136	118
0.058	262524	232511	110589	266122	220661	220	35	74	106	308
0.042	204023	205124	283277	200404	192678	119	204	299	148	42
0.065	165717	193381	259088	235762	122214	230	48	181	304	78
0.094	230289	228629	149404	296298	291796	63.5	170	285	318	219
0.041	262395	181589	172644	252628	204682	141	212	345	248	38
0.09	223359	287109	218727	151775	264097	60.9	310	233	256	151

0.065	253228	218465	270807	111561	237466	227	116	313	294	90
0.066	263920	200864	208697	194574	204093	338	21	249	153	129
0.057	177536	282143	236375	156396	294591	189	322	293	117	65
0.076	252848	210439	234541	227129	140613	323	28	260	166	102
0.082	227047	285080	218857	281919	226756	332	350	270	124	167
0.084	273935	252164	261637	279942	142818	230	97	332	166	71
0.066	258705	266300	137709	250032	233666	62	201	296	320	157
0.094	269097	102163	185643	221578	251847	188	127	278	345	57
0.047	194706	188522	229502	256383	190356	238	133	121	37	305
0.046	248400	185524	250076	297339	238716	232	305	120	40	255
0.056	147487	214952	203417	229096	220106	228	190	313	106	13
0.051	278829	225398	258858	261714	172777	225	25	295	193	95
0.083	212216	237162	235698	201315	183907	321	120	253	195	38
0.06	251597	213765	174522	255666	206365	131	214	359	266	34
0.046	238091	188349	210054	243789	110087	327	15	266	159	103
0.092	217282	268062	221837	299264	214091	349	258	301	118	147
0.05	222556	237788	221506	235261	251591	227	116	141	40	317
0.067	166365	217014	147391	144202	296239	305	229	350	148	72
0.077	216984	287722	260712	252527	219755	360	315	211	91	148

**TAB. 5.9.** Objetivos encontrados pelo ARMOGA utilizando o polipropileno como material isolante.

Tmin (°C)	CI	CO	MinCICO
42.01	16257.40	2498.97	18756.37
54.60	31030.46	3062.82	34093.28
30.10	6991.59	2749.28	9740.87
53.84	28656.23	2931.37	31587.60
42.28	16338.64	2794.31	19132.95
44.13	16943.45	2744.70	19688.15
39.06	13086.73	2936.42	16023.16
49.24	21251.86	2727.86	23979.71
52.29	24571.71	3173.53	27745.24
53.27	25174.31	3098.87	28273.18
46.01	16822.92	2934.81	19757.73
55.61	31589.97	2637.64	34227.61
33.30	9274.45	2712.24	11986.69
35.33	9077.78	3123.34	12201.12
38.58	12667.33	2598.55	15265.88
37.69	10931.78	3065.79	13997.57
51.94	24847.26	2739.96	27587.22
41.69	14479.77	2820.90	17300.67
31.87	8726.30	2535.35	11261.65
54.52	30097.29	3124.57	33221.86
37.16	10551.15	2991.88	13543.03

42.97	17152.09	2486.30	19638.39
51.03	21817.50	3168.51	24986.01
46.61	19347.74	3012.23	22359.97
40.29	13676.63	2796.57	16473.20
31.17	7542.82	2778.89	10321.71
42.01	16257.40	2498.97	18756.37
54.60	31030.46	3062.82	34093.28
30.10	6991.59	2749.28	9740.87
53.84	28656.23	2931.37	31587.60
42.28	16338.64	2794.31	19132.95
44.13	16943.45	2744.70	19688.15
39.06	13086.73	2936.42	16023.16
49.24	21251.86	2727.86	23979.71
52.29	24571.71	3173.53	27745.24
53.27	25174.31	3098.87	28273.18
46.01	16822.92	2934.81	19757.73
55.61	31589.97	2637.64	34227.61
33.30	9274.45	2712.24	11986.69
35.33	9077.78	3123.34	12201.12
38.58	12667.33	2598.55	15265.88
37.69	10931.78	3065.79	13997.57
51.94	24847.26	2739.96	27587.22
41.69	14479.77	2820.90	17300.67
31.87	8726.30	2535.35	11261.65
54.52	30097.29	3124.57	33221.86
37.16	10551.15	2991.88	13543.03
42.97	17152.09	2486.30	19638.39
51.03	21817.50	3168.51	24986.01



**FIG. 5.14.** Matriz de correlação entre as variáveis que foram utilizadas na otimização feita pelo ARMOGA utilizando o polipropileno como material isolante.

### Comentários

Pode-se observar com os resultados apresentados acima que o método que apresenta uma espessura média para o MOGT de 0.064 metros, já o MOSA apresentou a espessura média de 0.068 metros e o ARMOGA uma espessura média de 0.067 metros. Porém, a potência média requerida para o MOGT foi 856 KW, já o MOSA utilizou uma potência média de 681 KW e o ARMOGA usou uma potência média de 885 KW.

Todos os métodos tiveram uma potência requerida menor que 985 KW, para manter a temperatura do óleo acima de 30°C. Se comparada com a potência de 1.38 MW, utilizada por Su et al., em 2005 para manter a temperatura a 25°C durante a parada de produção, obtêm-se uma economia mínima de 395 KW. E uma espessura média menor que 0.07 metros. Se comparada com a espessura de 0.076 metros utilizada por Su et al., tem-se uma economia de 2840.64, para uma tubulação de 5 km.

#### 5.2.1.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

Observando a figura 5.15, tem-se a comparação entre os três métodos de otimização empregados, onde será feita uma análise da soma dos custos em relação à temperatura mínima do óleo, que está parada na tubulação para encontrar o melhor método de otimização para o problema, onde o último gere os menores custos com as maiores temperaturas.

De acordo com a figura, todos os três métodos empregados apresentaram bons resultados, com soluções bem próximas para o polipropileno como material isolante. Logo, qualquer um dos três métodos seria uma boa opção para a otimização do problema do pipe-in-pipe com aquecimento ativo.

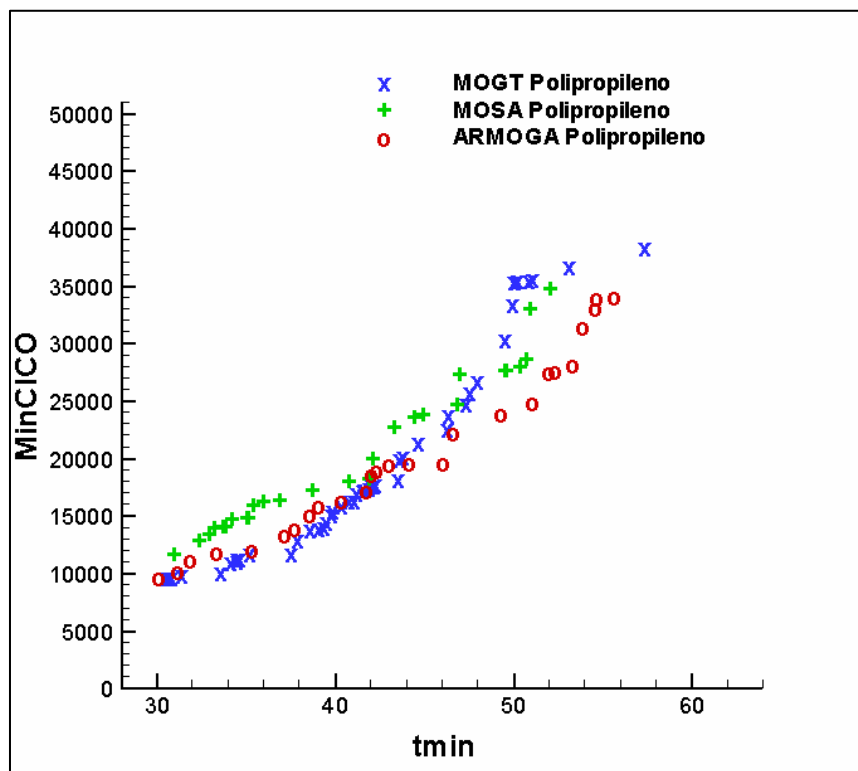


FIG. 5. 15. Comparação entre os métodos de Otimização utilizando o polipropileno.

## 5.2.2 DADOS DA LÃ MINERAL

Para a otimização do problema proposto, utilizando a lã mineral como material isolante, foi necessário o emprego de superfícies de respostas. Devido às propriedades termofísicas da lã mineral, a solução numérica para o problema de condução de calor multicamadas com geração de calor, apresentou um tempo elevado para a execução do programa, já que o polipropileno apresentou um tempo médio de execução de três minutos. A lã mineral precisou de um tempo 10 a 15 vezes maior que o tempo do polipropileno. Como os métodos de otimização rodam o programas centenas ou milhares de vezes, logo não seria muito viável otimizar direto o programa utilizando a lã mineral como material isolante, pois esse processo levaria semanas ou até meses.

O modeFrontier® apresenta vários tipos de superfícies de respostas; no entanto, foi realizado uma comparação entre os resultados virtuais gerados pelas superfícies de respostas e os resultados reais gerados pelo programa de condução de calor em coordenadas cilíndricas, com o objetivo de encontrar o menor erro e, com isso, as soluções mais confiáveis.

A tabela 5.10 apresenta os erros percentuais do processo de otimização utilizando superfícies de resposta. Os erros são calculados pelas diferenças entre os resultados virtuais gerados pela otimização com superfície de resposta com os resultados reais encontrados pelo programa de condução de calor multicamadas. Para essa otimização foi feita utilizando 100% da superfície de resposta. Nota-se que foram escolhidos três pontos, selecionados de forma aleatória para essa comparação. Observando a tabela 5.10 nota-se que para *tmin* o processo gaussiano (*GP*) tem os menores erros. Pois, pois para as Redes Neurais (*NN*), funções de base radial (RBF Hardy Multi), o Kriging e SVD (Single Value Decomposition) apresentaram péssimos resultados para esse objetivo, ou seja, erros bem acima de 10%. Logo, foi empregado o processo gaussiano como superfície de resposta para a otimização do sistema pipe-in-pipe utilizando a lã mineral como material isolante.

**TAB. 5.10.** Comparação entre as superfícies de respostas

Tmin	Nº. de pontos	GP	kriging	NN	(RBF Hardy Multi)	SVD
Erro %	1	9.254417	0.18711	102.6041	2.890593	18.22779
Erro %	2	10.84087	14.1636	88.39437	18.8134	47.67949
Erro %	3	0.241983	53.784	58.57512	114.8702	17.34377



### 5.2.2.1 MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVOS O MOGT

A tabela 5.11 mostra os valores gerados pelas variáveis otimizadas e a tabela 5.12 apresenta os valores da função objetivo. O software modeFrontier® rodou o programa 5000 vezes para a otimização do sistema, o que correspondeu a menos de 5 segundos utilizando 100% da superfície de resposta. Podemos observar que, a temperatura do óleo varia de 39°C a 59.7°C, aproximadamente, respeitando a restrição de 30°C imposta no software e a soma dos custos varia de 2242 a 28638.62. E com a potência requerida variando de 234 KW a 800 KW para toda a tubulação de 5 km. Observa-se que a lã mineral apresentou um custo de operação bem menor que o polipropileno e também espessuras menores, porém esses valores apresentam um pequeno erro, mostrado na tabela 5.10. Nota-se que o tempo gerado para gerar a fronteira de pareto foi de segundos, uma fantástica diminuição em relação ao tempo apresentando anteriormente pela otimização feita pelo MOGT utilizando o polipropileno que demorou mais de 10 horas. Outra diferença observada foi no número de soluções, pois o MOGT gerou 49 soluções utilizando o polipropileno como material isolante e a lã mineral gerou 67 soluções. Outro ponto positivo da lã mineral é que ela apresenta uma voltagem de 46.8 W/m a 160 W/m. Se for comparada com Denniel e Laouir (2001), que utilizou uma voltagem de 100 W/m para a manutenção da temperatura da linha produção submersa acima do ponto crítico, geralmente entre 20°C a 40°C. Tem-se uma economia de 53.2 W/m, para a menor temperatura encontrada pelo otimizador e ainda apresentando uma temperatura de 39°C para a parada de produção de oito horas.

Observando as tabelas 5.11 e 5.12 nota-se que mesmo mudando o material isolante o MOGT obteve os aquecedores sendo colocados bem próximos e em muitos casos, tem-se dois aquecedores na mesma posição, isso significa que naquele caso, não era necessário cinco aquecedores. Mesmo assim apresentou um custo menor em relação ao polipropileno apresentado anteriormente, isso é devido o custo mais barato da lã mineral em relação ao polipropileno.

Na figura 5.15 a influência dos aquecedores elétricos é maior do que as apresentadas pelo MOGT utilizando o polipropileno como material isolante, porém a espessura continua apresentando uma maior influência na temperatura do óleo. Nesse caso, a espessura tem uma maior influência na temperatura mínima do óleo, de acordo com a figura 5.15. Porém, as influências dos aquecedores apresentaram uma melhora em relação ao outro material isolante

utilizado. Nota-se, que para a lã mineral não tem correlação para CI e CO, pois para esse caso foi feito um novo programa no modeFrontier®, onde, a única variável de saída é *tmin*.

**TAB. 5.11.** Variáveis otimizadas pelo MOGT utilizando a lã mineral como material isolante.

Espessura (m)	G1 (W/m <sup>3</sup> )	G2 (W/m <sup>3</sup> )	G3 (W/m <sup>3</sup> )	G4 (W/m <sup>3</sup> )	G5 (W/m <sup>3</sup> )	$\phi$ 1 (graus)	$\phi$ 2 (graus)	$\phi$ 3 (graus)	$\phi$ 4 (graus)	$\phi$ 5 (graus)
0.09	176260	150964	166590	245969	125765	183	183	183	183	183
0.098	52750	200341	146678	139723	136518	204	247	247	176	183
0.025	250000	9674	242819	242104	0	21	6.5	360	6.5	296
0.025	250000	9674	250000	250000	102416	21	6.5	360	6.5	311
0.025	250000	9674	250000	250000	166769	21	6.5	360	6.5	296
0.025	250000	9674	250000	236217	138094	21	6.5	360	6.5	318
0.025	250000	9674	250000	250000	141109	21	6.5	360	6.5	318
0.025	250000	9674	242819	242104	0	21	6.5	360	6.5	296
0.025	215866	34057	242819	242104	0	21	6.5	360	49	296
0.025	155434	44177	242819	242104	0	6.5	6.5	360	63	296
0.025	250000	0	242819	242104	0	6.5	6.5	353	70	296
0.025	250000	9674	246409	244329	68548	21	6.5	360	6.5	303
0.025	250000	9674	248205	245442	102823	21	6.5	360	6.5	311
0.025	250000	9674	249102	245998	119960	21	6.5	360	6.5	311
0.025	250000	9674	249551	241108	180550	21	6.5	360	6.5	311
0.025	250000	9674	249327	236662	219618	21	6.5	360	6.5	311
0.025	250000	9674	250000	240441	212835	21	6.5	360	6.5	311
0.025	250000	9674	249663	250000	232071	21	6.5	360	6.5	303
0.025	250000	9674	249495	250000	250000	21	6.5	360	6.5	296
0.025	110084	33593	97518	250000	195140	6.5	6.5	360	6.5	296
0.025	110084	30299	95063	250000	162171	14	6.5	360	14	296
0.025	0	0	0	183562	32931	6.5	6.5	360	63	360
0.025	0	0	0	183562	0	6.5	6.5	360	63	360
0.078	61217	84522	124807	165003	232472	14	14	360	42	325
0.025	231599	15255	0	142165	0	6.5	56	360	6.5	360
0.025	205205	3007.4	0	210294	0	6.5	56	360	6.5	360
0.025	250000	3007.4	0	210294	33857	6.5	28	346	28	360
0.08	250000	0	37824	176389	63861	6.5	113	346	28	339
0.078	250000	15255	172586	142165	87565	6.5	339	346	28	360
0.041	250000	50650	140241	197039	41613	6.5	106	346	28	339
0.025	250000	8621.4	0	235117	0	6.5	6.5	346	28	339
0.025	250000	0	0	191122	0	6.5	6.5	346	28	360
0.025	250000	3775.8	14204	123484	6040.5	6.5	49	339	21	353
0.025	250000	0	14204	155655	6040.5	6.5	56	360	6.5	360
0.025	250000	0	0	250000	0	6.5	42	360	6.5	360
0.025	227603	0	0	250000	0	6.5	42	353	14	339
0.06	250000	0	182931	123484	155569	6.5	49	254	6.5	360

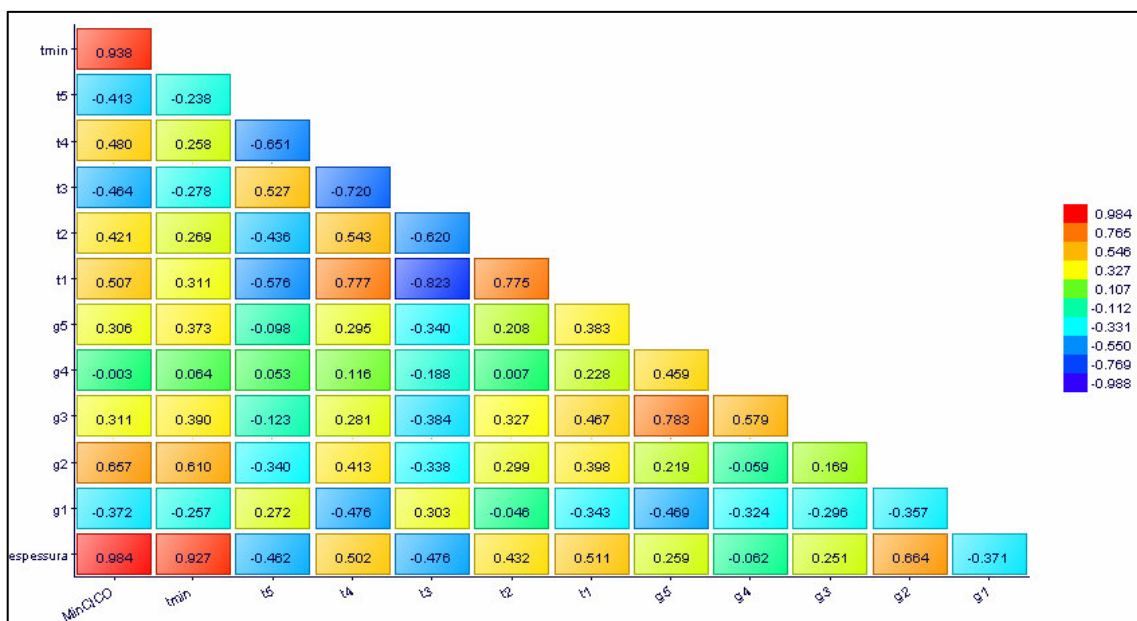
0.025	250000	0	1509.5	63232	590.05	6.5	49	360	6.5	360
0.025	250000	0	1509.5	90398	590.05	6.5	56	360	6.5	360
0.072	250000	161840	31761	0	133939	6.5	70	275	35	240
0.025	250000	0	0	90398	0	6.5	56	360	6.5	360
0.025	250000	0	0	90398	0	6.5	56	360	6.5	360
0.025	250000	0	0	45199	0	6.5	56	360	6.5	360
0.025	250000	352.26	0	76815	94.396	6.5	56	360	6.5	360
0.025	250000	693.52	0	179052	0	6.5	56	360	6.5	353
0.025	250000	0	0	45199	0	6.5	56	360	6.5	360
0.025	250000	0	0	67799	0	6.5	56	360	6.5	360
0.025	250000	0	0	47909	0	6.5	56	360	6.5	360
0.025	250000	0	0	61007	0	6.5	56	360	6.5	360
0.025	250000	0	0	45199	0	6.5	56	360	6.5	360
0.025	250000	0	0	56499	0	6.5	56	360	14	360
0.025	250000	0	0	57854	0	6.5	56	360	14	360
0.025	250000	0	0	57854	0	6.5	56	360	14	360
0.025	250000	88.066	0	56499	0	6.5	56	360	14	360
0.025	250000	0	0	0	0	6.5	6.5	360	6.5	360
0.025	249923	18.576	0	30669	0	6.5	35	360	14	360
0.025	249846	74.305	90015	95238	85534	6.5	84	360	14	360
0.025	249846	37.153	90015	95238	85534	6.5	84	360	14	360
0.025	249691	37.153	90015	122677	85534	6.5	113	360	14	360
0.025	249846	74.305	90015	99805	85534	6.5	91	360	14	360
0.025	249846	81.186	90015	93540	85534	6.5	84	360	14	360
0.025	249846	189147	90015	89588	85534	6.5	84	360	14	360
0.025	249846	37.153	90015	95238	85534	6.5	84	360	14	360
0.025	249846	37.153	14269	95238	13218	6.5	84	360	14	360
0.025	250000	63262	90015	96069	85534	6.5	98	360	6.5	360
0.057	249846	189147	110260	89588	113222	6.5	84	353	14	318

**TAB. 5.12.** Objetivos encontrados pelo MOGT utilizando a lã mineral como material isolante.

CI	CO	Tmin (°C)	MinCICO
26422.82	2215.80	59.58	28638.62
31760.10	1730.59	59.97	33490.69
1741.78	1906.17	44.36	3647.94
1741.78	2206.95	45.23	3948.73
1741.78	2371.69	45.63	4113.47
1741.78	2263.00	45.41	4004.78
1741.78	2306.00	45.53	4047.78
1741.78	1906.17	44.36	3647.94
1741.78	1881.21	43.85	3622.98
1741.78	1752.41	43.29	3494.18

1741.78	1881.40	44.01	3623.18
1741.78	2096.54	44.90	3838.32
1741.78	2191.73	45.19	3933.50
1741.78	2239.32	45.32	3981.10
1741.78	2383.06	45.71	4124.84
1741.78	2471.12	45.94	4212.89
1741.78	2465.15	45.93	4206.93
1741.78	2538.01	46.10	4279.78
1741.78	2583.47	46.20	4325.25
1746.52	1757.02	43.32	3503.54
1746.52	1657.90	42.96	3404.43
1762.57	554.22	39.55	2316.79
1773.02	469.92	39.35	2242.94
19449.79	1710.14	58.73	21159.92
1741.78	995.89	41.65	2737.67
1741.78	1071.38	41.80	2813.16
1741.78	1272.73	42.41	3014.50
20410.45	1351.87	58.83	21762.32
19337.37	1708.98	58.58	21046.35
4846.02	1739.63	48.15	6585.64
1741.78	1263.97	42.38	3005.75
1741.78	1129.27	42.10	2871.05
1759.17	1017.61	41.65	2776.78
1759.17	1090.30	42.07	2849.47
1741.78	1280.00	42.60	3021.78
1741.78	1222.66	42.20	2964.44
10731.66	1822.68	54.01	12554.34
1749.83	807.25	41.27	2557.08
1749.83	876.79	41.44	2626.63
16207.99	1478.50	55.64	17686.49
1741.78	871.42	41.41	2613.20
1741.78	871.42	41.41	2613.20
1741.78	755.71	41.09	2497.49
1741.78	837.79	41.31	2579.57
1741.78	1100.15	42.02	2841.93
1741.78	755.71	41.09	2497.49
1741.78	813.56	41.25	2555.34
1741.78	762.65	41.10	2504.42
1741.78	796.18	41.20	2537.96
1741.78	755.71	41.09	2497.49
1741.78	784.64	41.12	2526.42
1741.78	788.11	41.13	2529.88
1741.78	788.11	41.13	2529.88
1741.78	784.86	41.13	2526.64
1741.78	640.00	40.94	2381.78

1741.78	718.36	41.02	2460.14
1741.78	1333.01	42.63	3074.79
1741.78	1332.91	42.62	3074.69
1741.78	1402.76	42.72	3144.54
1741.78	1344.70	42.63	3086.48
1741.78	1328.68	42.61	3070.46
1741.78	1802.57	43.40	3544.35
1741.78	1332.91	42.62	3074.69
1741.78	953.88	41.50	2695.66
1741.78	1497.29	42.89	3239.07
9843.81	1925.28	53.24	11769.09



**FIG. 5.16.** Matriz de correlação entre as variáveis que foram utilizadas na otimização feita pelo MOGT utilizando a lã mineral como material isolante.

### 5.2.2.2 MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVOS O MOSA

Neste momento, a otimização do sistema pipe-in-pipe com aquecimento elétrico ativo na parede será feita pelo método Multi Objective Simulated Annealing e a lã mineral como material isolante.

A tabela 5.13 mostra os valores gerados pelas variáveis otimizadas e a tabela 5.14 apresenta os valores da função objetivo. O software modeFrontier® rodou o programa 10.000

vezes, o que correspondente aproximadamente a 20 segundos, utilizando o MOSA com superfície de resposta e dobrando o número de soluções encontrados pelo MOGT apresentados pelas tabelas 5.11 e 5.12, porém o MOSA precisou de um numero 40 vezes maior de iterações. Pode-se observar também, que a temperatura do óleo varia de 36.9°C a 59.9°C, aproximadamente, respeitando a restrição de 30°C imposta no software e a soma dos custos varia de 2578.48 a 23978.5. E com a potência requerida variando de 205 KW a 810 KW para toda a tubulação de 5 km. O MOSA apresentando aproximadamente à mesma potência requerida que o MOGT. Observa-se também que os resultados gerados pela otimização utilizando o MOSA apresentaram uma maior variação das espessuras em relação ao MOGT.

A figura 5.16 apresenta uma pior correlação entre os aquecedores elétricos e a temperatura mínima do óleo, em relação à figura 5.23. Por isso que a correlação dos aquecedores está mais distante da correlação da espessura do material isolante.

**TAB. 5.13.** Variáveis otimizadas pelo MOSA utilizando a lã mineral como material isolante.

Espessura (m)	G1 (W/m <sup>3</sup> )	G2 (W/m <sup>3</sup> )	G3 (W/m <sup>3</sup> )	G4 (W/m <sup>3</sup> )	G5 (W/m <sup>3</sup> )	φ 1 (graus)	φ 2 (graus)	φ 3 (graus)	φ 4 (graus)	φ 5 (graus)
0.082	199011	112462	106113	194245	201102	21	70	346	127	197
0.034	62491	41859	77258	241995	95593	28	14	353	14	261
0.026	104918	53766	38026	216507	122982	21	247	204	14	360
0.073	233622	164023	237920	207652	248930	28	63	261	233	226
0.031	213130	161667	229379	73153	93798	28	14	268	63	176
0.05	236885	71380	216136	190807	249579	289	49	353	6.5	261
0.027	179480	184678	197264	111531	66729	14	21	282	63	148
0.026	179058	185277	194834	112776	66411	14	21	282	63	148
0.026	129102	35526	45167	109529	37471	98	233	226	6.5	190
0.027	121303	33475	49738	111522	30301	91	240	226	6.5	190
0.04	186736	46082	115460	228825	232728	63	148	275	35	162
0.026	101016	93704	49896	113976	21262	77	240	303	49	176
0.026	2982.7	7096	12406	37570	40854	14	63	240	275	197
0.025	214573	7486.4	192028	248725	61116	63	240	353	14	113
0.025	213250	7269.3	192870	248956	59244	63	240	353	14	113
0.046	110016	153650	222738	193773	216897	6.5	14	176	70	183
0.026	12856	33714	176207	154564	25671	28	35	311	91	63
0.04	214501	25104	223533	232107	77453	70	254	325	42	134
0.04	149623	160726	190773	199722	218431	28	28	169	42	162
0.026	23026	48302	170267	139969	19501	49	56	296	56	35
0.027	40670	54183	188734	123246	23471	14	77	339	28	6.5
0.027	22338	75296	183303	136110	17396	35	28	353	21	14

0.027	22146	81670	183794	134406	26153	28	21	353	14	6.5
0.027	22215	81568	183782	134417	26295	28	21	353	14	6.5
0.028	19701	73131	202689	122338	31069	6.5	42	353	6.5	14
0.058	199891	72181	207136	183232	186137	63	14	353	233	204
0.095	81990	119218	194410	183651	39926	63	70	63.1	120	134
0.039	157166	134613	205238	189539	232304	49	14	113	35	190
0.069	204587	87686	214009	45948	226316	155	162	318	28	339
0.042	161373	137968	173153	212707	223474	14	28	134	49	212
0.025	95610	100796	210096	209849	87071	42	219	339	106	296
0.039	235994	41574	181560	235161	205585	134	49	162	35	190
0.042	161227	137753	173303	212668	223657	14	28	134	49	212
0.025	193725	113497	17935	37752	15954	141	325	148	63	226
0.049	177123	164552	185331	214120	229722	14	35	134	28	204
0.049	177100	164656	185246	214202	230012	14	35	134	28	204
0.042	226924	30085	183301	222079	206772	148	14	190	21	204
0.049	175564	167738	200825	219804	230911	21	35	141	35	204
0.042	210961	22892	186057	216104	218539	148	14	190	28	212
0.045	167437	167067	198941	213761	239099	35	28	127	21	197
0.028	171978	16467	229222	33614	204091	77	289	318	14	339
0.044	240422	219591	53564	85.49	121597	35	14	311	91	332
0.047	157399	175001	208513	217851	241844	42	28	141	42	197
0.027	182001	8658.2	218136	30021	201776	91	296	318	21	332
0.077	247495	143087	239572	41381	190693	148	127	268	14	353
0.046	142550	179521	187478	234410	239442	35	49	155	21	183
0.077	241427	139863	243801	35202	190063	148	127	268	14	346
0.068	235627	227343	137437	124438	165406	169	35	318	169	318
0.046	143716	179619	188161	234999	239100	35	49	155	21	183
0.04	185938	83046	218622	193383	228387	84	56	134	35	254
0.052	210610	81649	206922	213051	241070	35	49	148	42	318
0.057	207476	113507	180856	249279	249105	63	35	176	91	325
0.026	105709	8669.8	7980.1	23710	106411	219	148	311	49	42
0.055	205980	111466	183665	238082	249808	63	42	169	91	318
0.052	238071	197716	181408	38889	211158	127	14	332	148	346
0.028	90325	90508	178871	100893	8652.9	14	98	346	28	70
0.059	242607	106214	151113	195825	239625	28	28	212	98	311
0.025	105516	121290	156903	119340	104882	42	14	318	162	212
0.027	91006	91173	178307	97657	9195.2	14	98	346	35	70
0.061	214848	107773	146687	191480	235753	14	28	169	106	332
0.043	245691	157082	181453	33601	246137	127	21	318	148	353
0.028	91092	90975	178646	99128	9787.9	14	91	346	35	70
0.07	225895	113536	115177	233455	243315	21	14	162	91	254
0.043	246539	158418	181605	33977	246455	127	21	318	148	353
0.083	233819	244119	190463	210564	186702	148	339	311	14	120
0.066	233914	5231.2	247240	241204	196603	134	318	332	14	77
0.072	230045	116370	120165	230298	242736	21	14	162	84	254

0.043	241205	168977	178370	35666	247476	127	14	318	141	339
0.072	228706	116211	119716	230438	244130	21	14	162	84	254
0.044	245377	170005	175629	43603	241189	120	21	311	148	346
0.064	244406	221171	210743	101723	197050	127	84	311	14	63
0.083	245879	244636	209301	42203	244059	148	197	212	77	332
0.072	229043	115213	119578	229486	244127	21	14	162	84	254
0.087	208244	179607	223778	172474	178030	56	233	176	303	289
0.032	187238	3747.8	132446	220931	103582	35	190	346	56	204
0.07	242021	205026	206950	95589	184773	127	91	332	28	63
0.043	49838	249244	220810	20363	11424	21	28	360	42	353
0.07	225300	117385	107487	235442	237017	28	21	155	77	275
0.07	225205	117250	107553	235556	236940	28	21	155	77	275
0.032	186901	3475.1	131830	220708	104639	35	183	339	56	204
0.036	232662	141156	181093	15687	217517	141	28	339	42	339
0.069	240888	206424	208200	97458	187321	127	91	332	28	56
0.073	236850	134871	120366	237066	238261	42	14	162	63	275
0.033	231213	139499	197279	22478	234351	141	6.5	325	49	360
0.069	243020	206984	202953	82660	173198	120	77	325	42	56
0.032	186934	34254	152916	201184	103831	49	183	346	35	212
0.034	227041	115561	163411	27508	241590	162	63	339	28	339
0.027	203988	25791	155364	188730	99490	42	219	353	42	226
0.033	229977	108730	159065	31219	236648	162	63	339	28	346
0.07	249409	212030	207830	84159	173429	106	77	325	49	56
0.036	242191	140748	217683	204271	131207	49	91	169	35	183
0.082	181902	107094	102631	217610	194587	35	49	212	56	311
0.036	231796	135360	224240	199574	138590	49	77	176	35	183
0.031	212670	39215	193996	221371	131712	21	204	339	49	183
0.062	232203	248877	228521	117680	193244	91	49	332	91	106
0.035	238223	142078	228127	196201	129479	56	63	183	35	183
0.033	201184	48353	186100	219146	131877	28	204	339	42	190
0.07	248664	241723	237173	115039	178363	70	63	311	106	77
0.081	230208	116964	120736	158423	244165	49	162	318	169	360
0.026	201741	44896	179593	244231	136448	28	219	360	42	197
0.026	81890	18956	12918	14163	80046	176	212	268	14	91
0.079	239206	237773	234426	121967	179592	91	77	303	98	91
0.025	172360	39758	232838	130108	39333	56	28	346	113	70
0.082	181864	106967	102640	217588	194594	35	49	212	56	311
0.084	121889	82245	145591	187709	172317	42	219	282	6.5	346
0.081	230938	122552	117207	154061	242713	49	155	325	190	360
0.026	98317	6279.7	38106	2927.6	84173	183	254	289	14	84
0.026	174819	44414	231471	122961	47984	49	21	346	113	63
0.08	231373	125185	118429	153489	242173	49	155	325	190	360
0.083	173369	120260	87275	220619	188579	28	70	247	70	282
0.078	238458	234667	236894	123529	182349	84	77	311	106	91
0.079	217667	115580	121807	136733	226125	28	127	325	176	353



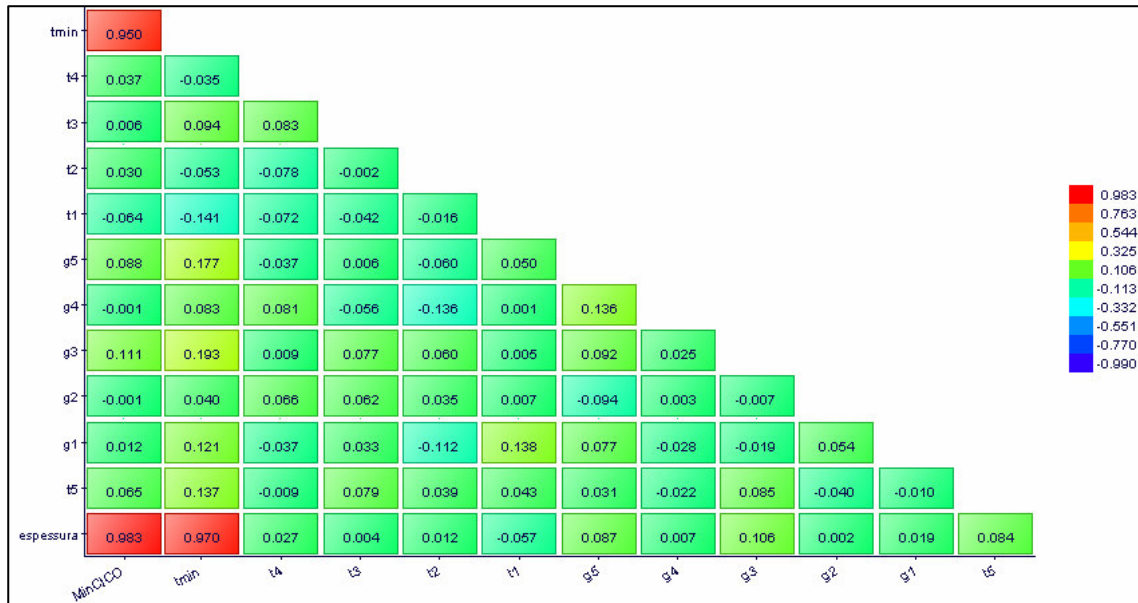
0.081	175308	130885	81900	212979	194086	28	63	268	84	289
0.029	164511	131229	65498	211375	202979	35	14	212	49	240
0.042	217476	114755	140427	52726	235271	176	113	332	6.5	325
0.025	96653	4905.7	20426	29326	107167	183	268	318	14	77
0.051	235217	51365	231943	218683	157188	28	42	141	63	212

**TAB. 5.14.** Objetivos encontrados pelo MOSA utilizando a lâ mineral como material isolante.

CI	CO	Tmin (°C)	MinCICO
21402.12	2081.11	59.88	23483.23
3349.63	1329.14	44.32	4678.77
1929.48	1372.67	40.80	3302.15
16728.02	2795.90	58.32	19523.91
2709.24	1974.09	44.36	4683.32
7287.31	2469.85	50.58	9757.16
2029.16	1893.59	42.78	3922.75
1948.54	1890.19	42.60	3838.73
1830.47	913.40	38.45	2743.87
2093.84	886.63	38.91	2980.47
4605.50	2073.17	46.81	6678.67
1858.75	972.43	38.71	2831.17
1952.45	258.32	36.31	2210.77
1770.84	1853.26	42.13	3624.10
1758.54	1847.27	42.09	3605.81
6132.08	2296.51	48.97	8428.59
1959.22	1031.71	39.60	2990.93
4500.24	1978.10	46.41	6478.34
4561.55	2353.34	47.23	6914.89
1958.89	1026.72	39.35	2985.61
2019.44	1101.58	40.25	3121.02
2013.51	1112.17	40.30	3125.69
2016.93	1147.31	40.48	3164.24
2019.40	1147.59	40.49	3166.99
2209.51	1149.26	41.05	3358.77
10199.48	2172.36	52.57	12371.83
29801.06	1585.14	60.00	31386.20
4281.28	2352.28	46.69	6633.55
14786.77	1993.08	55.53	16779.84
5071.89	2326.21	47.91	7398.10
1801.85	1800.76	41.69	3602.61
4311.93	2303.68	46.59	6615.60
5063.19	2326.04	47.90	7389.23
1747.54	969.89	37.08	2717.43

6933.43	2485.37	50.42	9418.80
6939.63	2486.31	50.43	9425.95
5136.99	2225.05	47.70	7362.04
7225.12	2546.80	50.83	9771.92
5170.27	2187.66	47.59	7357.92
5969.08	2524.94	49.34	8494.02
2205.72	1677.75	42.67	3883.48
5577.03	1626.27	47.58	7203.30
6426.47	2561.56	49.78	8988.03
1965.37	1639.91	41.94	3605.28
19012.14	2207.30	58.73	21219.44
6244.86	2517.51	49.52	8762.37
18944.28	2176.91	58.57	21121.19
14425.25	2279.04	55.19	16704.29
6096.28	2523.12	49.38	8619.40
4721.84	2328.00	47.35	7049.84
8051.20	2440.45	51.93	10491.65
9885.18	2560.57	53.44	12445.75
1932.14	646.35	36.90	2578.49
8986.57	2531.85	52.52	11518.42
7987.46	2220.14	50.95	10207.60
2140.08	1201.28	41.01	3341.36
10382.18	2394.59	53.90	12776.77
1763.28	1556.30	40.84	3319.59
2032.26	1196.39	40.75	3228.65
11508.60	2295.15	54.29	13803.75
5307.92	2211.75	48.24	7519.67
2137.46	1202.25	41.00	3339.71
15163.95	2384.33	56.79	17548.28
5361.40	2219.50	48.32	7580.90
21934.85	2728.11	59.97	24662.95
13578.60	2365.93	54.95	15944.53
16270.32	2405.41	57.59	18675.73
5482.40	2231.54	48.46	7713.94
16442.51	2404.36	57.69	18846.86
5568.61	2242.05	48.57	7810.66
12510.87	2496.24	54.70	15007.10
22324.51	2524.36	60.00	24848.86
16320.92	2399.87	57.61	18720.79
24680.28	2463.06	60.00	27143.34
2855.96	1658.74	43.87	4514.70
15018.71	2391.96	56.15	17410.67
5299.15	1412.30	46.84	6711.45
15117.59	2361.94	56.72	17479.53
15129.12	2361.61	56.72	17490.72

2984.60	1657.74	44.06	4642.33
3628.70	2017.58	46.12	5646.27
14953.62	2407.14	56.11	17360.76
16738.03	2476.58	58.08	19214.61
3159.42	2111.54	45.74	5270.96
14859.85	2326.57	55.82	17186.42
2813.23	1738.54	44.02	4551.77
3194.33	1984.28	45.21	5178.62
1973.88	1723.81	42.55	3697.69
3183.81	1960.04	45.17	5143.84
15065.98	2372.75	56.16	17438.73
3727.89	2396.42	46.39	6124.31
21290.34	2057.79	59.73	23348.14
3645.24	2379.67	46.31	6024.91
2661.66	2045.35	44.66	4707.01
11786.02	2612.54	54.63	14398.57
3552.91	2391.32	46.25	5944.23
3040.87	2013.85	45.12	5054.72
15408.27	2613.67	56.99	18021.93
21132.54	2228.47	59.87	23361.01
1895.99	2065.69	43.35	3961.67
1817.90	532.41	36.50	2350.31
19730.06	2593.19	59.28	22323.25
1790.70	1572.86	41.26	3363.56
21277.90	2057.36	59.72	23335.26
22813.04	1816.96	59.90	24630.00
20765.77	2220.73	59.58	22986.49
1814.90	588.29	36.65	2403.20
1841.84	1591.42	41.47	3433.26
20669.40	2228.86	59.55	22898.26
21955.84	2022.66	59.89	23978.50
19077.28	2600.70	59.00	21677.98
19969.06	2093.86	59.11	22062.92
20703.87	2035.60	59.33	22739.47
2386.47	1985.52	43.50	4371.98
5060.76	1947.28	47.27	7008.04
1762.16	661.70	36.81	2423.86
7678.14	2289.65	50.90	9967.80



**FIG. 5.17.** Matriz de correlação entre as variáveis que foram utilizadas na otimização feita pelo MOSA utilizando a lã mineral como material isolante

### 5.2.2.3 MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVOS O ARMOGA

Neste momento, será feita otimização do sistema pipe-in-pipe com aquecimento elétrico ativo na parede, utilizando o método An efficient Multi-Objective Genetic Algorithm e a lã mineral como material isolante.

A tabela 5.15 mostra os valores gerados pelas variáveis otimizadas e a tabela 5.16 apresenta os valores da função objetivo. O software modeFrontier® rodou o programa 5.000 (cinco mil) vezes, o que corresponde a menos de 15 (quinze) segundos. Nota-se que o método ARMOGA gerou o mesmo número de soluções do método MOSA, porém em menos tempo, além disso, diminui pela metade o número de vezes que o programa foi rodado. Porém, o ARMOGA precisou de um número 20 vezes maior de iterações, em relação ao MOGT. Pode-se observar que a temperatura do óleo varia de 39.5°C a aproximadamente 60°C, respeitando a restrição de 30°C imposta no software e a soma dos custos varia de 2893.35 a 25210.13. E com a potência requerida variando de 361.5 KW a 941.5 KW para toda a tubulação de 5 km. O ARMOGA apresentou um aumento na potência requerida em relação aos outros dois métodos utilizados. Como visto anteriormente, para o polipropileno, o ARMOGA também apresentou uma boa distribuição dos aquecedores, por isso que os valores da espessura da

camada isolante diminuíram em relação ao MOSA. Já em relação ao MOGT esses valores estão bem próximos, porém o ARMOGA apresenta uma correlação mais equilibrada entre os aquecedores e a espessura da camada isolante em relação à temperatura mínima do óleo, como mostra a figura 5.16.

**TAB. 5.15.** Variáveis otimizadas pelo ARMOGA utilizando a lã mineral como material isolante.

Espessura (m)	G1 (W/m <sup>3</sup> )	G2 (W/m <sup>3</sup> )	G3 (W/m <sup>3</sup> )	G4 (W/m <sup>3</sup> )	G5 (W/m <sup>3</sup> )	$\phi$ 1 (graus)	$\phi$ 2 (graus)	$\phi$ 3 (graus)	$\phi$ 4 (graus)	$\phi$ 5 (graus)
0.08	228867	200736	203709	112606	194479	77	136	264	144	141
0.03	207105	36543	197703	53281	167799	54	6.9	330	21	297
0.07	220655	172555	225188	234397	241925	34	32	314	56	308
0.03	168152	112298	52639	20984	26500	56	112	231	106	100
0.05	243969	244003	247998	217062	233139	9.1	70	347	25	360
0.07	240641	198110	239675	232947	242823	35	20	314	29	350
0.06	249745	240819	246480	237018	232060	19	64	353	27	336
0.05	245626	198016	228985	230533	228992	24	43	344	10	342
0.07	242442	197533	235869	233770	247451	9.7	29	316	7.6	336
0.03	244465	160424	229677	235314	233534	18	7.3	355	26	355
0.03	220087	185897	246709	234492	230326	31	6.7	345	12	350
0.04	247582	247800	246322	242776	233147	23	49	344	35	350
0.03	195678	27964	161304	45727	174075	31	9.7	327	10	293
0.03	212870	99251	161368	9018.3	139428	20	73	311	11	355
0.03	247638	185741	230397	240203	228631	9.7	7	355	12	345
0.03	233302	102103	214341	167623	245325	10	15	349	13	353
0.04	240743	232771	235910	224699	220702	7.9	44	342	14	356
0.03	247440	61535	233911	218912	214460	13	94	355	18	328
0.06	226207	174032	235649	227463	243265	12	25	358	29	343
0.06	242982	199122	249328	232102	222235	24	70	345	21	357
0.05	237928	244284	238738	240983	248392	19	42	357	37	346
0.05	246308	229469	234332	207610	225357	13	16	342	18	339
0.03	239469	11629	154730	84767	80436	36	37	333	52	314
0.03	168112	69037	66955	20092	99753	56	133	260	88	232
0.07	242519	191836	249163	207838	221317	9.3	43	346	13	346
0.06	237324	238740	237984	244323	238213	17	37	342	24	349
0.07	249854	167331	236685	229857	235718	6.9	32	349	11	335
0.05	243832	246427	249187	230302	226376	24	15	350	39	352
0.04	240897	233756	236066	239801	232954	11	20	343	38	355
0.04	247873	149532	243536	245585	246189	25	13	355	15	358
0.05	246183	208185	242218	233496	229402	8.2	11	346	36	328
0.06	241644	215725	248863	228925	232219	8.8	13	358	14	323
0.04	247925	186553	236499	237341	218302	16	42	336	7.6	346
0.03	248566	247006	236252	226729	236298	17	28	357	31	344

0.06	242219	246623	235716	224642	233347	18	26	343	34	334
0.03	245418	231140	235133	185473	233573	18	18	336	12	359
0.04	247957	149337	249476	241041	230380	21	8.5	357	12	347
0.06	247579	220706	236862	249152	248385	25	49	342	31	350
0.03	237296	135013	229718	169639	240412	11	32	353	15	340
0.07	240479	200656	242197	229999	248645	24	28	320	6.7	346
0.07	240636	199213	229523	232766	247353	12	16	343	33	338
0.03	244531	187311	241001	185717	242464	23	15	340	12	336
0.03	243179	246342	234159	229039	234595	13	25	346	34	359
0.03	249083	25410	200285	219045	185954	21	24	355	22	320
0.07	238178	206866	229684	229684	240855	18	42	349	27	354
0.06	248400	229600	230039	233463	231042	9.4	32	336	16	327
0.03	223273	22711	243596	222103	168159	24	31	329	17	342
0.05	241256	228295	246506	229028	234068	12	17	350	30	349
0.04	249197	236650	239031	227051	231713	10	24	352	22	329
0.03	248511	145529	246581	217522	244073	22	16	349	14	359
0.05	247755	200910	246206	212004	232608	11	24	344	21	352
0.03	232256	41221	169945	176201	212031	18	53	317	12	336
0.03	186141	89525	221346	83595	156653	17	37	323	10	338
0.06	248964	230974	224112	227543	227461	13	37	353	24	360
0.04	248075	197835	239454	184994	228466	14	47	350	18	357
0.03	230691	106838	245905	142202	223635	17	37	343	25	339
0.03	194890	78437	18389	23545	105804	28	135	310	65	89
0.07	238529	226634	238180	228319	228824	17	36	354	19	355
0.06	246882	228788	238077	232659	228441	18	35	350	42	355
0.04	242854	205656	232347	241191	241994	22	14	343	9.4	333
0.07	245587	208493	236509	238791	235220	27	33	322	23	347
0.03	243822	157624	235096	239634	239889	40	16	348	24	355
0.03	207456	97710	221040	118188	175682	13	36	323	9.2	346
0.06	247441	215368	238060	233158	247445	24	48	343	22	349
0.05	242490	196944	237860	244144	228984	14	32	355	14	356
0.05	241832	232615	248491	236331	231080	8.3	10	355	26	333
0.04	235292	182719	236295	243153	228758	16	13	352	29	351
0.03	244845	166598	230930	168130	238762	9.9	31	348	12	350
0.06	245314	218446	229530	234365	233625	12	37	346	21	335
0.03	243475	166935	231183	234613	234155	9.2	33	330	11	348
0.03	243755	173445	215841	236610	233558	21	39	357	25	353
0.04	242716	173726	240337	240291	232792	12	13	359	57	356
0.03	203743	11328	181039	145395	249117	15	7.6	352	6.7	340
0.04	226153	190658	246711	235277	230368	27	9.3	345	13	350
0.04	247307	243115	246407	231865	229947	24	15	345	8.1	350
0.03	248936	160439	226159	228359	247895	15	7.4	349	20	351
0.04	241281	234222	244069	238386	233677	16	15	337	20	357
0.06	235339	188831	246656	247125	222291	13	30	339	15	360
0.04	241814	238806	249375	243546	232192	9.1	15	345	11	357

0.07	240727	215153	235554	225180	232981	11	19	357	19	321
0.04	247362	177472	234517	248634	238586	25	7.4	344	12	356
0.03	165159	90932	141851	99694	15700	17	52	337	20	299
0.04	248591	200667	248309	238379	225849	30	20	346	17	357
0.05	247796	199947	228867	236681	228701	14	20	358	18	357
0.03	248770	151647	245860	227575	247132	15	10	349	15	358
0.05	244157	244724	246538	235217	228637	40	14	337	11	353
0.03	244431	232614	231074	235034	234986	13	15	345	16	353
0.04	248132	179899	235019	227132	229807	22	31	358	26	355
0.07	241108	231871	238575	219348	233011	11	19	348	41	328
0.07	242991	160244	235043	219461	238016	12	20	343	8.6	338
0.04	246703	190524	233778	242626	224183	20	8.3	346	9.3	298
0.03	247244	224686	230951	205187	229805	13	15	350	20	340
0.03	249191	180092	242547	244352	233762	22	12	350	24	354
0.03	247575	218466	243602	223843	230180	17	23	352	25	347
0.07	248429	191352	239127	231808	249331	19	9.7	350	26	340
0.07	241221	160358	242741	238069	221082	31	28	357	20	359
0.06	239024	176295	236197	222063	243098	19	29	353	30	342
0.05	247615	209307	243781	247189	247857	25	42	342	30	355
0.06	236286	196152	238806	233870	247807	14	22	343	31	353
0.03	244809	185022	159228	214391	205922	8.5	15	353	17	350
0.03	239867	202942	240149	225703	246153	13	30	348	13	327
0.05	240391	242269	249015	246216	235926	13	27	339	11	360
0.03	248801	94970	177138	232475	248047	19	23	348	13	344
0.07	240814	200938	233051	242602	229084	10	15	337	25	325
0.05	247168	175291	227879	237745	247051	13	8.6	332	18	359
0.05	244295	211949	242335	224751	235600	15	27	342	21	352
0.05	243119	200900	248787	227601	221308	12	16	345	23	350
0.06	233832	218759	240362	231706	239545	16	23	339	29	355
0.03	249122	190375	236193	218395	238365	11	9.3	341	14	353
0.06	241761	157750	248139	218307	239679	15	17	357	15	358
0.06	233553	173871	248076	235868	243260	11	31	348	18	344
0.07	247213	212889	228109	235866	234571	14	14	334	32	338
0.05	247407	225929	236794	228680	239310	13	15	340	18	351
0.04	249937	231362	237612	209868	239400	18	20	347	11	327
0.05	246133	141128	246586	228908	237852	6.9	11	356	15	317
0.03	241759	224026	249949	197852	235151	19	30	338	15	356
0.06	236921	176133	228469	246548	216290	13	16	345	14	360
0.06	240425	217851	234682	232715	232270	12	27	344	16	340
0.05	245708	181011	242847	236375	221364	11	20	351	8.1	330
0.06	236930	186932	247058	228158	221311	12	11	348	14	357
0.03	246885	175021	238814	225886	238657	31	19	349	13	352
0.04	245510	178213	246376	226383	234806	25	24	350	12	352
0.04	247989	169335	226145	249736	240374	24	31	348	13	348
0.05	237081	235546	240957	232548	246565	16	15	336	33	358

0.04	247487	215132	236267	227707	237702	13	10	338	18	349
0.05	248249	248410	236963	191246	237358	15	8.5	357	16	341
0.03	237296	139360	227773	236309	245309	16	28	355	12	359
0.04	249973	184640	243801	247565	234608	27	21	356	18	350
0.06	246630	207098	234438	228047	224931	8.2	9.2	343	7	353
0.03	209002	55981	11571	68172	110791	28	57	320	73	355
0.03	247928	207537	244379	233518	236064	20	15	357	18	348
0.04	248595	153561	241349	234253	230614	19	22	357	25	342
0.03	196821	162384	155476	132796	16815	16	28	344	20	359
0.03	238183	214032	240171	217576	235710	16	16	339	9.6	336
0.03	228893	20697	215347	172098	245738	15	37	356	14	339
0.05	242393	129148	246901	220733	247513	15	8.4	339	15	349
0.06	249945	235032	236946	217842	196155	15	11	351	24	359
0.05	248327	163064	240435	244965	235532	8.1	17	337	15	352
0.04	249156	160456	241131	225381	241170	13	11	336	22	351
0.06	248899	159754	224178	245562	248019	15	7.1	348	9.4	351
0.04	234760	200037	246173	239027	234688	18	14	360	16	353
0.07	242917	173371	234485	241866	249594	19	8.6	352	41	349
0.04	242415	234760	236624	231433	233501	7.9	18	344	56	355
0.04	203601	249470	246463	243438	240817	11	15	344	11	357
0.04	241128	185817	246948	238595	234017	14	16	344	13	355
0.03	247815	232556	243605	242489	226848	12	27	343	8	350
0.06	246007	193956	237336	237732	232534	13	35	351	16	347

**TAB. 5.16.** Objetivos encontrados pelo ARMOGA utilizando a lã mineral como material isolante

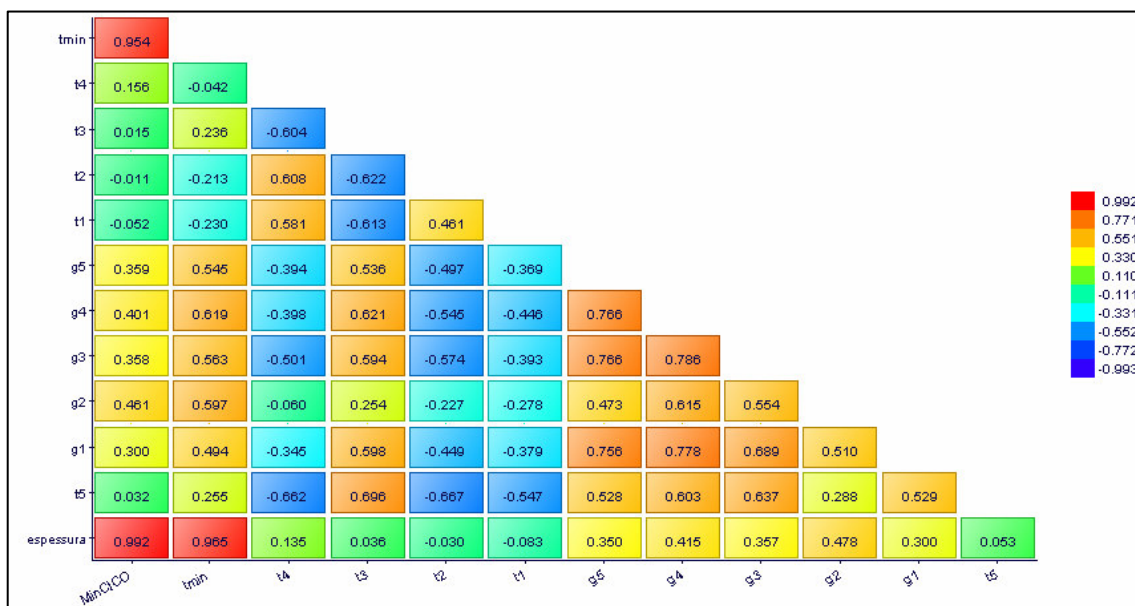
CI	CO	Tmin	MinCICO
22802.72	2407.41	59.99	25210.13
1760.07	1695.82	42.98	3455.90
16764.63	2802.48	59.99	19567.11
1778.07	974.26	38.34	2752.33
6454.74	3036.60	53.28	9491.34
15459.33	2954.74	59.97	18414.07
9785.07	3087.67	56.36	12872.74
6249.04	2898.31	52.78	9147.35
13927.48	2962.09	59.25	16889.57
3417.80	2824.74	49.40	6242.54
2753.36	2860.83	48.24	5614.19
5643.62	3117.13	52.49	8760.75
1768.63	1548.16	42.73	3316.78
1860.30	1592.16	42.90	3452.45
2230.98	2899.48	47.72	5130.47
2150.79	2464.50	46.49	4615.28



4239.39	2956.35	50.64	7195.74
1946.03	2499.22	45.98	4445.25
11227.56	2832.93	57.13	14060.50
11571.17	2933.17	57.43	14504.33
8580.16	3098.43	55.39	11678.59
9031.56	2926.28	55.52	11957.83
1747.78	1461.84	42.38	3209.62
1808.04	1085.31	39.51	2893.35
14824.11	2848.44	59.69	17672.55
11744.34	3063.25	57.89	14807.59
14837.42	2865.78	59.88	17703.20
8502.01	3062.08	55.29	11564.08
5239.87	3029.69	51.99	8269.56
4534.04	2899.75	51.18	7433.79
8409.47	2968.28	55.09	11377.75
12094.34	2988.48	58.24	15082.82
4361.08	2884.15	50.65	7245.23
2297.00	3058.82	47.88	5355.82
12912.58	3027.32	58.55	15939.90
2408.61	2894.69	47.73	5303.29
3822.58	2862.57	50.18	6685.15
12539.85	3078.87	58.45	15618.71
2135.92	2590.92	46.64	4726.84
14062.08	2974.66	59.32	17036.74
13870.30	2942.70	59.18	16813.00
2296.70	2818.62	47.36	5115.32
3120.64	3039.52	49.20	6160.16
1999.02	2252.23	45.61	4251.25
13086.89	2931.88	58.58	16018.77
12490.66	3001.71	58.33	15492.37
1841.12	2252.39	45.18	4093.52
8035.00	3018.63	54.91	11053.63
5122.18	3030.13	51.92	8152.31
3204.42	2821.68	49.13	6026.09
5945.56	2917.08	52.67	8862.64
1917.38	2129.04	44.78	4046.42
1832.06	1887.38	43.83	3719.45
11899.23	2967.18	57.91	14866.41
4249.55	2812.99	50.34	7062.54
1779.69	2430.13	45.38	4209.83
1756.69	1077.93	39.51	2834.61
14876.22	2970.84	59.95	17847.06
10275.18	3007.61	56.64	13282.79
5364.38	2979.95	52.10	8344.33
13239.38	2981.38	58.65	16220.76

2957.80	2857.13	48.57	5814.92
1935.43	2099.39	44.74	4034.82
11168.13	3024.57	57.36	14192.70
7006.57	2945.08	53.90	9951.65
9040.64	3047.30	55.91	12087.93
3633.27	2883.12	49.73	6516.39
1771.31	2686.12	46.16	4457.43
12496.95	2972.88	58.28	15469.83
1973.31	2842.52	46.89	4815.84
3014.33	2824.22	48.60	5838.54
4243.36	2892.45	50.57	7135.81
1775.24	2024.00	44.62	3799.24
3501.00	2890.67	49.50	6391.67
3523.45	3068.52	49.98	6591.97
2076.89	2846.17	47.25	4923.07
5718.70	3050.59	52.65	8769.29
10245.46	2919.02	56.62	13164.48
4517.90	3086.68	51.49	7604.57
13329.46	2942.96	58.89	16272.42
5615.60	2935.22	52.43	8550.82
1776.29	1314.14	41.80	3090.43
3612.71	2974.20	49.88	6586.91
6736.26	2923.50	53.61	9659.76
2981.01	2869.72	48.97	5850.73
6114.13	3070.14	52.97	9184.27
3232.85	3016.04	49.46	6248.88
3625.95	2867.17	49.68	6493.12
14621.53	2979.62	59.65	17601.15
13089.60	2805.13	58.53	15894.74
4024.69	2912.80	50.24	6937.50
2518.85	2912.96	48.01	5431.81
3093.44	2943.86	49.15	6037.30
3417.59	2978.99	49.60	6396.57
14127.67	2969.72	59.55	17097.39
13927.29	2824.89	59.07	16752.18
11079.90	2858.69	57.02	13938.59
6279.11	3061.12	53.17	9340.22
9568.98	2951.48	56.06	12520.45
2110.17	2583.99	46.50	4694.16
2529.08	2956.33	48.13	5485.40
6643.25	3107.37	53.82	9750.62
1768.17	2563.66	45.90	4331.84
13489.38	2935.01	58.90	16424.40
8276.24	2905.94	54.98	11182.18
7185.19	2966.86	53.98	10152.05

6286.47	2922.79	53.04	9209.27
10159.69	2980.36	56.51	13140.05
2949.10	2899.07	48.86	5848.17
11679.45	2830.43	57.71	14509.88
11189.51	2904.65	57.33	14094.16
13090.50	2966.14	58.65	16056.64
8382.88	3015.99	55.25	11398.87
3516.77	2990.54	49.73	6507.30
7565.97	2817.55	54.24	10383.53
2107.20	2940.77	47.27	5047.97
11241.88	2827.16	57.26	14069.04



**FIG. 5.18.** Matriz de correlação entre as variáveis que foram utilizadas na otimização feita pelo ARMOGA utilizando a lã mineral como material isolante.

## Comentários

Observando os resultados da comparação entre as várias superfícies de respostas testadas para a otimização, tem-se que para a interpolação para temperatura mínima do óleo *tmin*, apresenta uma dificuldade de manter-se com o erro inferior a 11%, pois se encontra uma grande variação do erro. Para o problema PIP utilizando a lã mineral como material isolante, a melhor superfície de resposta encontrada foi o processo gaussiano de acordo com a tabela 5.12, uma grande surpresa, já que fazendo alguns testes para outros tipos de problemas, a

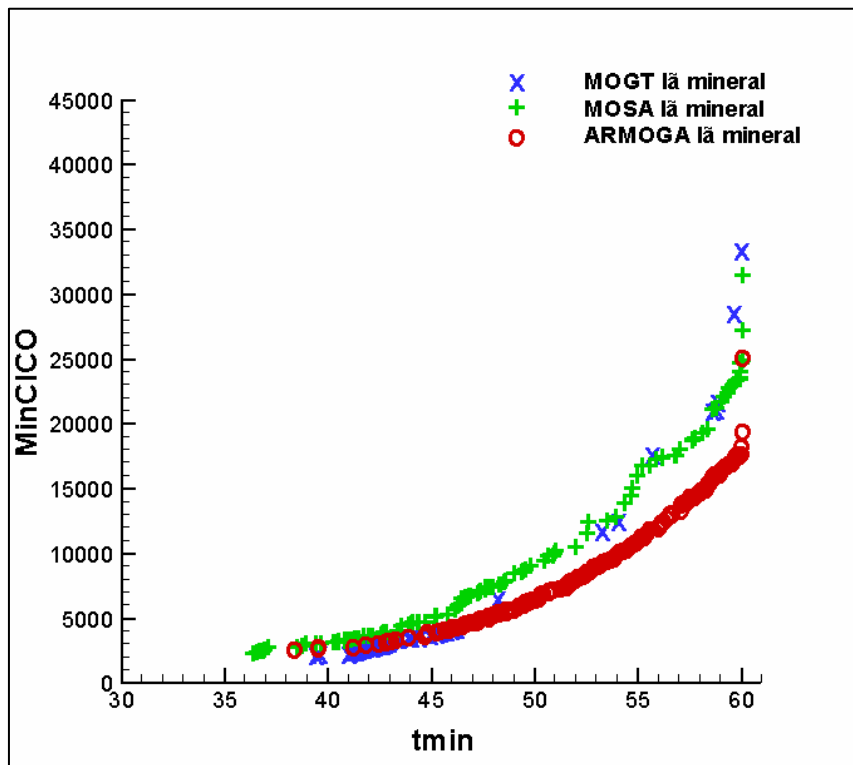
melhor superfície de resposta encontrada foi função de base radial. Assim sendo, de acordo com o problema, tem-se uma melhor superfície de resposta, já que cada superfície utiliza um tipo de formulação matemática para interpolar os pontos gerados.

Pode-se observar com os resultados apresentados acima que o método que apresenta uma espessura média para a camada isolante utilizando a lã mineral igual à de 0.032 metros para o MOGT, 0.048 metros em relação ao MOSA e o 0.046 metros para o ARMOGA. Já para a potência média requerida, obteve os seguintes valores: 455 KW para MOGT, uma potência de 661 KW para MOSA e o ARMOGA usou uma potência média de 859 KW. Todos os métodos tiveram uma potência requerida menor que 941 KW, para manter a temperatura do óleo acima de 30°C. E uma espessura média menor que 0.05 metros. Uma diminuição bem significativa, em todos os custos, se comparada com o polipropileno como material isolante. Por isso, se Tought et. Al (2001) tivesse utilizado o pipe-in-pipe com aquecimento ativo, eles não teriam descartado a lã mineral como material isolante, pois não precisariam de uma espessura tão grande e ainda economizariam, já que a lã mineral mostrou ser bem mais barata em todos os custos.

#### *5.2.2.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO*

Observando a figura 5.18, mostra que o método de otimização que encontrou a fronteira de Pareto foi o ARMOGA. Pois, suas soluções estão melhores ou iguais aos outros dois métodos.

O MOGT continua apresentando um número menor de soluções e maiores custos em relação aos outros métodos de otimização. Verifica-se também que as soluções do MOGT se mostraram boas com o emprego da lã mineral como material isolante, pois o conjunto de soluções geradas por esse método se encontra bem próxima da fronteira de Pareto proporcionada pelo ARMOGA, porém em algumas partes suas soluções apresentam um pequeno distanciamento das soluções do ARMOGA, como visto na figura abaixo. Analogamente, para o MOSA que também apresentou ótimas soluções. Logo, o MOGT, MOSA e o ARMOGA seriam boas escolhas para a otimização do problema utilizando a lã mineral.



**FIG. 5.19.** Comparação entre os métodos de Otimização utilizando a lã mineral.

### 5.2.3 DADOS DO POLIPROPILENO+LÃ MINERAL

#### 5.2.3.1 MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVOS O MOGT

Nesta seção será conduzida à otimização do sistema pipe-in-pipe com aquecimento elétrico ativo na parede, na qual será utilizado o método Multi-Objective Game Theory e o polipropileno+lã mineral como material isolante. Com o intuito, diminuir os custos e de gerar mais opções para o sistema pipe-in-pipe. Por isso, nesse caso tem-se 12 (doze) variáveis de entrada, pois serão duas camadas isolantes, uma camada para o polipropileno (*Esp*) e uma camada para a lã mineral (*Espl*).

Para essa nova camada isolante não foi utilizada as superfícies de respostas, pois o tempo de CPU é de quatro a cinco minutos, ou seja, tempo considerado razoável para a otimização do problema, e com a finalidade de evitar o trabalho gerado pelas superfícies de respostas,

com comparação e a procura das melhores superfícies de respostas. Portanto, foi mais atrativo otimizar direto o problema.

A tabela 5.17 mostra os valores gerados pelas variáveis otimizadas e a tabela 5.18 apresenta os valores da função objetivo. O software modeFrontier® rodou o programa 1025 (trezentos e vinte oito) vezes para a otimização do sistema, o que corresponde a 69.7 horas, utilizando o MOGT com diferentes valores para cada variável de entrada. Podemos observar que a temperatura do óleo varia de 38.54°C a 60°C, aproximadamente, respeitando a restrição de 30°C imposta no software e a soma dos custos varia de 4439.8 a 53855.7. E com a potência requerida variando de 18 KW a 544.81 KW para toda a tubulação de 5 km. De acordo com a tabela 5.21 a *espessural* sempre apresenta valores maiores que a *espessura*, a fim de minimizar o custo de instalação. Nota-se que os aquecedores apresentam uma melhora no sentido da posição, pois para esse material isolante têm-se os aquecedores melhores distribuídos, em relação aos outros dois materiais isolantes utilizados. Nota-se também, que se tem uma potência requerida bem menor que os outros dois materiais isolantes utilizados.

Agora ao analisar a figura 5.19 encontra-se a *Esp*, a *Espl* e os aquecedores apresentam uma grande importância para a temperatura mínima do óleo, porém os aquecedores g1 e g4 têm pouca influência nesse objetivo. Nota-se também, que a *espessural* tem a maior influência nesse objetivo, pois apresentam o menor custo. Por isso, que o otimizador tende a aumentar o valor da lã mineral por ser mais barata.

**TAB. 5.17.** Variáveis otimizadas pelo MOGT utilizando o polipropileno+lã mineral como material isolante.

Esp (m)	Espl (m)	G1 (W/m3)	G2 (W/m3)	G3 (W/m3)	G4 (W/m3)	G5 (W/m3)	$\phi$ 1 (graus)	$\phi$ 2 (graus)	$\phi$ 3 (graus)	$\phi$ 4 (graus)	$\phi$ 5 (graus)
0.037	0.079	54387	206752	250000	96053	0	242	85.1	92	255	65
0.091	0.096	53304	237721	19745	0	16953	268	6.55	209	255	33
0.072	0.094	0	230713	0	31425	248811	360	105	281	334	6.5
0.08	0.097	0	230713	0	24786	147506	360	105	281	334	6.5
0.08	0.08	237210	163126	0	105569	82943	340	321	281	59	360
0.05	0.071	5629	128999	165389	250000	136359	144	190	144	144	301
0.025	0.04	102123	76487	18574	183567	74130	262	275	52	118	288
0.025	0.05	102123	81994	18574	183567	93793	262	275	52	118	164
0.025	0.052	102123	97509	18574	183567	70628	262	275	52	118	242
0.025	0.052	102123	107135	18574	183567	78317	262	275	52	118	177
0.025	0.056	102123	62188	18574	183567	158123	262	275	52	118	223
0.029	0.033	102123	60673	18574	183567	57946	262	275	52	118	301
0.025	0.032	102123	99818	18574	183567	124056	262	275	52	118	177
0.029	0.033	59403	60673	91155	159019	57946	137	196	33	59	255

0.072	0.045	37141	58859	84825	115410	44101	196	216	33	46	255
0.028	0.053	173404	41516	102712	193483	33975	85.1	281	327	268	255
0.025	0.025	47738	0	78751	0	44214	360	321	137	6.6	249
0.025	0.025	187167	30484	11907	162234	0	203	308	6.5	26	236
0.025	0.025	181263	0	45516	179359	0	242	314	85	46	131
0.025	0.025	175360	0	45516	179359	0	242	314	85	46	151
0.025	0.025	187167	0	65801	55221	83865	295	314	98	20	236
0.025	0.025	182739	0	45516	179359	0	242	314	85	46	190
0.025	0.025	188643	0	45516	179359	0	242	314	85	46	170
0.025	0.025	195284	0	45516	179359	0	242	314	85	46	183
0.025	0.025	185137	0	45516	179359	0	242	314	85	46	157
0.025	0.025	187167	13644	63926	0	70755	157	288	72	98	236
0.025	0.025	197682	0	45516	179359	0	242	314	85	46	151
0.025	0.025	205154	0	45516	179359	0	242	314	85	46	131
0.025	0.025	187167	0	57738	0	101887	275	340	72	196	236
0.025	0.025	215301	0	45516	179359	0	242	314	85	46	157
0.025	0.025	230383	0	45516	179359	0	242	314	85	46	157
0.025	0.025	0	0	0	0	22976	334	360	6.5	85	360
0.025	0.025	230383	11370	38908	80687	100817	360	327	105	249	157
0.054	0.05	38449	118871	52278	80687	37713	78.5	45.8	203	249	236
0.025	0.025	0	0	0	148977	100817	360	360	105	157	360
0.025	0.025	0	0	0	105131	100817	360	360	105	196	360
0.025	0.025	0	0	0	135494	100817	360	360	105	203	360
0.025	0.025	0	0	0	179341	100817	360	360	105	164	360
0.025	0.025	15840	878.67	42422	19143	5924.3	164	360	360	52	308
0.025	0.025	21390	1151.6	49017	0	23697	203	353	360	164	327
0.025	0.025	15840	878.67	42422	26488	5924.3	164	360	353	39	314
0.025	0.025	16555	878.67	42422	35317	15798	164	360	353	183	301
0.025	0.025	21390	103.13	19267	0	23697	183	360	360	164	327
0.025	0.025	21390	0	2130.2	0	23697	144	360	360	164	327
0.025	0.025	16188	878.67	42422	47090	17115	164	360	347	124	281
0.025	0.025	18354	878.67	42422	70634	19748	164	360	340	137	242
0.025	0.025	21390	0	0	0	23697	118	360	360	164	327
0.025	0.025	21390	0	0	0	23697	131	360	360	164	327
0.025	0.025	18354	0	2130.2	70634	13165	118	360	360	6.6	242
0.067	0.062	18354	203346	221478	70634	56469	118	340	340	170	242
0.025	0.025	18354	0	0	70634	17029	118	301	360	33	242
0.025	0.025	19405	0	0	62148	19748	111	360	340	137	275
0.025	0.025	0	23.531	54986	221006	0	321	353	79	262	321
0.025	0.025	0	0	46324	221006	3.1245	321	360	79	268	308
0.025	0.025	285.22	20.723	69.914	22729	9890.2	340	334	236	105	353
0.025	0.025	0	0	0	22729	0	32.7	360	79	203	275
0.025	0.025	336.76	8.0504	241.54	22729	16378	85.1	314	13	223	65

**TAB. 5.18.** Objetivos encontrados pelo MOGT utilizando o polipropileno+lã mineral como material isolante

CI	CO	Tmin (°C)	MinCICO
29472.86	1554.41	59.41	31027.26
73510.10	838.97	60.00	74349.06
59112.89	1308.02	59.98	60420.91
67367.32	1031.70	60.00	68399.01
52348.24	1507.46	60.01	53855.70
30839.07	1757.13	59.54	32596.20
7869.45	1164.50	52.44	9033.95
10777.02	1228.93	54.24	12005.95
11577.45	1209.35	55.16	12786.80
11806.35	1253.66	55.22	13060.01
13371.67	1342.90	55.92	14714.57
7184.45	1082.58	49.36	8267.03
5684.56	1352.04	48.04	7036.60
7184.45	1096.18	49.66	8280.63
28027.67	871.26	58.49	28898.93
12837.37	1395.41	55.78	14232.78
4395.97	437.00	41.24	4832.97
4417.17	1002.99	44.59	5420.15
4381.61	1039.71	44.67	5421.32
4381.61	1024.60	44.56	5406.21
4381.61	1003.67	43.85	5385.27
4381.61	1043.50	44.70	5425.11
4381.61	1058.60	44.80	5440.21
4381.61	1075.60	44.91	5457.21
4381.61	1049.64	44.74	5431.25
4422.13	858.87	42.14	5280.99
4381.61	1081.74	44.95	5463.35
4381.61	1100.87	45.07	5482.47
4397.02	887.80	42.77	5284.83
4381.61	1126.85	45.23	5508.46
4381.61	1165.46	45.48	5547.06
4404.57	58.82	38.61	4463.39
4407.53	1183.14	47.04	5590.67
21814.02	839.67	57.29	22653.70
4404.57	639.49	41.61	5044.06
4404.57	527.23	41.35	4931.80
4404.57	604.95	41.56	5009.53
4404.57	717.21	42.12	5121.78
4411.33	215.57	39.46	4626.90
4396.66	243.85	39.50	4640.52
4411.33	234.37	39.58	4645.70
4411.33	284.08	40.26	4695.41
4393.00	165.01	39.33	4558.01
4385.65	120.88	39.20	4506.53
4411.33	316.65	40.54	4727.98



4411.33	389.21	41.23	4800.54
4381.61	115.42	39.02	4497.03
4381.95	115.42	39.10	4497.37
4385.65	266.96	39.58	4652.62
32874.46	1459.94	59.69	34334.39
4381.61	271.40	39.77	4653.01
4381.61	259.33	39.52	4640.94
4381.78	706.61	42.10	5088.39
4381.61	684.38	41.65	5065.99
4381.61	84.46	38.73	4466.07
4381.61	58.19	38.54	4439.79
4381.61	101.61	39.00	4483.22

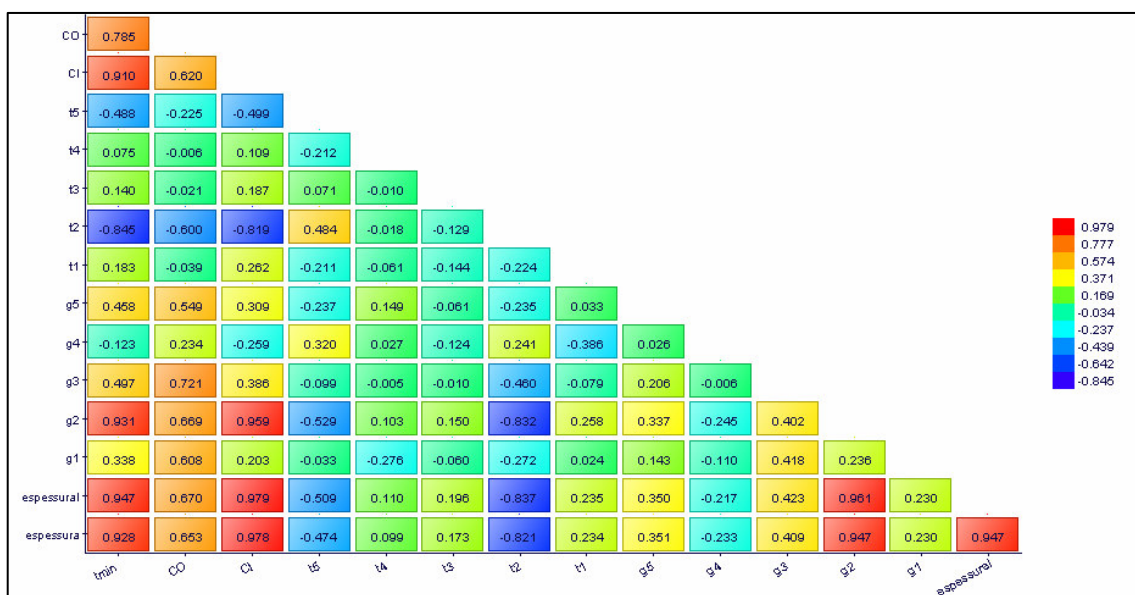


FIG. 5.20. Matriz de correlação entre as variáveis que foram utilizadas na otimização feita pelo MOGT utilizando o polipropileno+lã mineral como material isolante.

### 5.2.3.2 MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVOS O MOSA

Neste momento, a otimização do sistema pipe-in-pipe com aquecimento elétrico ativo na parede será feita pelo método Multi Objective Simulated Annealing e o polipropileno+lã mineral como material isolante.

A tabela 5.19 mostra os valores gerados pelas variáveis otimizadas e a tabela 5.20, apresenta os valores da função objetivo, onde, o software modeFrontier® rodou o programa

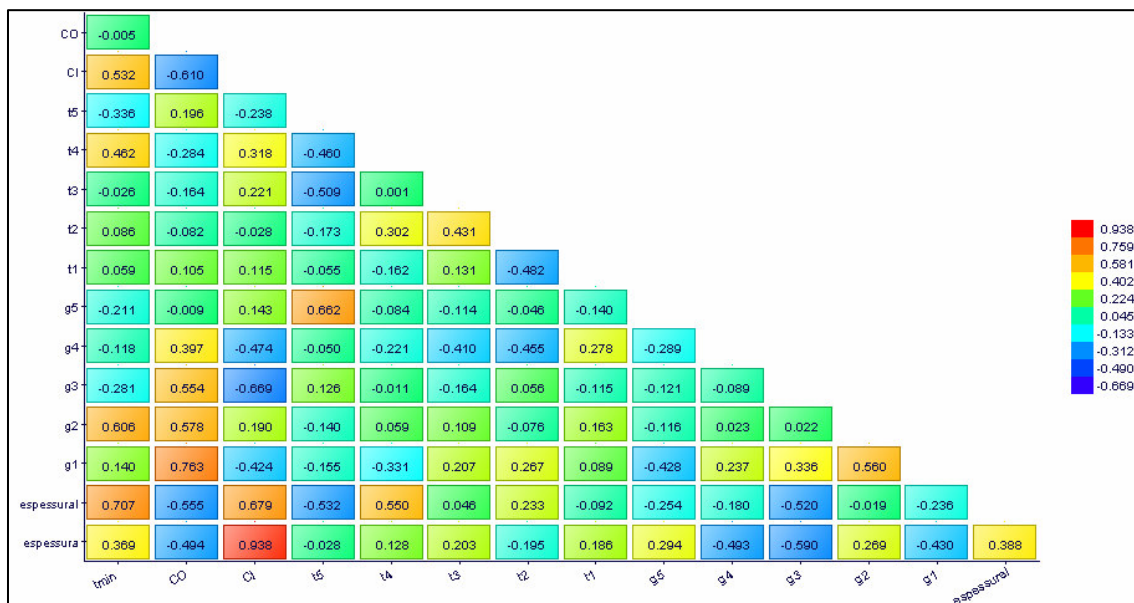
1728 vezes, o que correspondente a 117,5 horas, na qual as variáveis de entrada receberam diferentes valores. Portanto, pode-se observar que a temperatura do óleo varia de 45°C a 61°C, aproximadamente, respeitando a restrição de 30°C imposta no software e a soma dos custos varia de 7254.67 a 50174.77. E com a potência requerida variando de 485.3 KW a 814.6 KW. Mesmo rodando o programa quase duas mil vezes, o MOSA apresentou um conjunto pequeno de soluções, de acordo com as tabelas 5.22 e 5.23. Se o MOSA for comparado com o MOGT, ele sairia em desvantagem, pois em menos tempo de execução o MOGT gera um maior de conjunto de soluções. O MOSA apresenta maiores espessuras para as camadas isolantes. Porém, quando se observa a figura 5.20 nota-se que para esse método tem-se a correlação da *espessura*, *espessural*, e os aquecedores na temperatura do óleo são bem inferiores em relação ao MOGT.

**TAB. 5.19.** Variáveis otimizadas pelo MOSA utilizando o polipropileno+lã mineral como material isolante.

Esp (m)	Espl (m)	G1 (W/m3)	G2 (W/m3)	G3 (W/m3)	G4 (W/m3)	G5 (W/m3)	$\phi$ 1 (graus)	$\phi$ 2 (graus)	$\phi$ 3 (graus)	$\phi$ 4 (graus)	$\phi$ 5 (graus)
0.03	0.03	238281	214844	238281	97656	136719	66	360	223	236	164
0.07	0.03	191406	230469	160156	113281	152344	85	334	203	255	144
0.09	0.07	212891	154297	248047	216797	111328	353	26	229	183	105
0.06	0.07	230762	190635	149243	244847	171603	327	275	203	347	144
0.03	0.03	238118	214673	238138	98515	138123	66	360	223	236	164
0.07	0.03	188049	239650	160014	114137	151957	92	347	190	255	151
0.03	0.05	653.88	96756	208757	63175	209559	79	301	85	347	229
0.04	0.05	67752	165751	230707	145100	232600	321	340	281	144	131
0.03	0.04	164037	199916	227621	186923	148483	327	98	177	314	131
0.03	0.03	16570	59237	249860	109771	175969	59	151	164	236	144
0.04	0.1	57588	227996	194891	249794	237898	26	72	295	170	255
0.05	0.06	185357	198286	188307	228778	190177	216	196	281	353	151
0.05	0.06	182993	197118	190331	229202	190843	209	196	281	353	151
0.04	0.04	237479	76092	227146	137655	237907	144	327	164	26	236
0.04	0.04	233411	73340	226011	135428	242925	157	340	164	26	236
0.07	0.03	174523	227094	112747	191312	172827	314	79	124	255	281
0.03	0.05	120931	179145	93003	246774	98446	98	216	229	334	6.6
0.04	0.04	206924	72632	235026	79950	242918	190	327	105	52	301
0.05	0.08	245871	197454	247264	155617	180082	105	216	249	151	334
0.07	0.04	207948	243940	201453	175255	194686	33	190	223	340	177
0.03	0.03	132230	107667	83124	204369	206922	242	170	216	20	262
0.05	0.09	245446	191864	248364	151927	187035	118	209	255	144	327
0.06	0.04	218536	232790	249340	129274	212421	26	170	268	334	177

**TAB. 5.20.** Objetivos encontrados pelo MOSA utilizando o polipropileno+lã mineral como material isolante

CI	CO	Tmin (°C)	MinCICO
5803.79	2369.99	56.25	8173.78
20571.33	2170.01	60.85	22741.34
47759.75	2415.03	61.12	50174.77
37030.00	2526.93	61.00	39556.92
5886.99	2374.57	56.36	8261.56
22308.09	2185.75	60.86	24493.84
11211.07	1481.99	59.17	12693.06
16890.38	2155.30	60.76	19045.67
6932.15	2373.07	58.69	9305.22
5689.47	1565.20	45.13	7254.68
45722.67	2478.51	61.12	48201.18
24785.79	2536.76	60.93	27322.54
24389.66	2535.63	60.88	26925.29
11831.81	2345.68	60.62	14177.49
11296.77	2332.44	60.47	13629.21
23438.04	2248.96	60.87	25687.00
11254.84	1890.05	60.12	13144.89
13234.09	2143.88	60.73	15377.97
40774.33	2627.28	61.10	43401.61
26251.53	2619.62	61.00	28871.15
5999.32	1879.84	48.67	7879.16
40510.31	2623.05	61.06	43133.36
18572.36	2668.44	60.82	21240.80



**FIG. 5.21.** Matriz de correlação entre as variáveis que foram utilizadas na otimização feita pelo MOSA utilizando o polipropileno+lã mineral como material isolante.

### 5.2.3.3 MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVOS O ARMOGA

Neste momento, será feita otimização do sistema pipe-in-pipe com aquecimento elétrico ativo na parede, utilizando o método An efficient Multi-Objective Genetic Algorithm e o polipropileno+lã mineral como material isolante.

A tabela 5.21 mostra os valores atribuídos às variáveis de entrada e a tabela 5.22, os valores gerados pela otimização para conseguir soluções não-dominadas, ou seja, as melhores soluções. O software modeFrontier® rodou o programa 1710 vezes, o que corresponde a 117 horas. Observa-se que a temperatura do óleo varia de 45°C a aproximadamente 60°C, respeitando a restrição de 30°C imposta no software, à soma dos custos varia de 6138 a 14327. E com a potência requerida variando de 339 KW a 722 KW. Nota-se também que os números de soluções geradas pelo AMORGA foram muito inferiores ao número de soluções geradas pelos outros dois métodos. Este método também apresenta os valores muito próximos para as espessuras das camadas isolantes, semelhante ao MOSA, no entanto o ARMOGA apresenta menos opções de escolhas, porém, ele apresenta as menores espessuras para a camada isolante.

Observando a figura 5.21 nota-se que os aquecedores têm uma maior importância para a temperatura do óleo, já as espessuras apresentam uma menor influência em relação ao MOSA e ao MOGT.

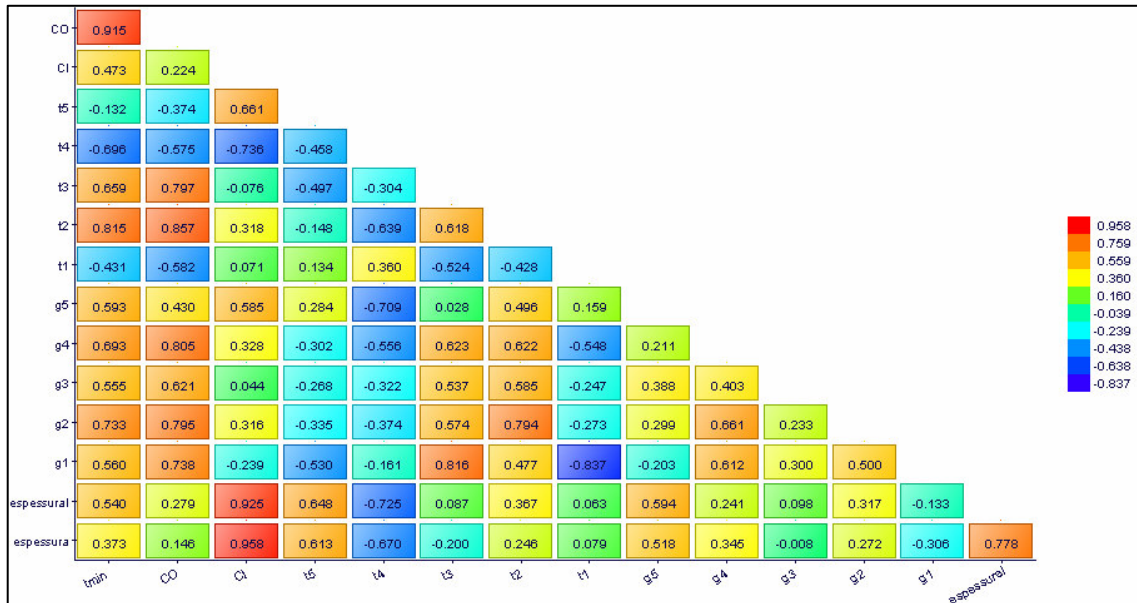
**TAB. 5.21.** Variáveis otimizadas pelo ARMOGA utilizando o polipropileno+lã mineral como material isolante.

Esp (m)	Espl (m)	G1 (W/m3)	G2 (W/m3)	G3 (W/m3)	G4 (W/m3)	G5 (W/m3)	$\phi$ 1 (graus)	$\phi$ 2 (graus)	$\phi$ 3 (graus)	$\phi$ 4 (graus)	$\phi$ 5 (graus)
0.026	0.026	215823	181954	169955	100097	122334	47	319	184	198	171
0.026	0.026	242552	192416	237587	96786	137795	50.4	322	185	257	103
0.026	0.028	233619	194765	204032	85694	117403	62.6	334	240	209	150
0.026	0.027	72804	91260	134491	50745	77841	125	205	84.8	311	215
0.04	0.039	117313	225646	192182	107452	190660	80.4	338	148	128	294
0.026	0.027	234944	188854	183619	91311	30427	46.4	300	193	268	173
0.026	0.026	43353	189808	242729	82705	150685	169	316	185	283	93.3
0.026	0.031	240482	205013	202807	84592	118134	65.3	334	220	237	139
0.026	0.027	50279	66081	219740	32917	117711	74.5	286	84.4	235	321
0.026	0.039	233884	209610	215290	80166	158662	75.6	339	261	191	235
0.026	0.025	232394	200654	198509	107391	49562	49.4	319	191	271	114
0.026	0.026	228136	233539	197125	83880	166973	60.7	323	207	224	126

0.026	0.027	81237	228640	125735	42508	100595	126	314	75.7	322	185
0.026	0.026	240485	198539	180166	81965	21794	60.8	283	229	311	124
0.026	0.026	215823	181954	169955	100097	122334	47	319	184	198	171
0.026	0.026	242552	192416	237587	96786	137795	50.4	322	185	257	103
0.026	0.028	233619	194765	204032	85694	117403	62.6	334	240	209	150
0.026	0.027	72804	91260	134491	50745	77841	125	205	84.8	311	215
0.04	0.039	117313	225646	192182	107452	190660	80.4	338	148	128	294
0.026	0.027	234944	188854	183619	91311	30427	46.4	300	193	268	173

**TAB. 5.22.** Objetivos encontrados pelo ARMOGA utilizando o polipropileno+lã mineral como material isolante

CI	CO	Tmin (°C)	MinCICO
4746.06	2022.78	52.56	6768.85
4702.89	2322.27	58.46	7025.16
5297.60	2138.89	58.49	7436.49
5045.49	1093.48	45.60	6138.97
12193.87	2133.12	60.00	14326.99
4844.32	1866.62	51.90	6710.94
4843.05	1815.78	51.13	6658.82
5789.41	2178.62	59.76	7968.03
5117.05	1246.02	45.92	6363.07
7565.19	2297.87	59.98	9863.07
4786.50	2018.57	53.63	6805.06
4646.23	2328.70	57.63	6974.94
5054.28	1481.51	49.30	6535.79
4691.44	1850.78	49.74	6542.21
4746.06	2022.78	52.56	6768.85
4702.89	2322.27	58.46	7025.16
5297.60	2138.89	58.49	7436.49
5045.49	1093.48	45.60	6138.97
12193.87	2133.12	60.00	14326.99
4844.32	1866.62	51.90	6710.94



**FIG. 5.22.** Matriz de correlação entre as variáveis que foram utilizadas na otimização feita pelo ARMOGA utilizando o polipropileno+lã mineral como material isolante.

## Comentários

Pode-se observar com os resultados apresentados acima que os métodos apresentam uma espessura média de 0.036 metros para o polipropileno e 0.035 metros para a lã mineral, já o MOSA apresentou uma espessura média de 0.048 metros para o polipropileno e 0.049 metros para a lã mineral e o ARMOGA apresentou a seguinte espessura média de 0.027 metros para o polipropileno e 0.028 metros para a lã mineral. Porém, a potência média requerida para o MOGT foi 248 KW, já o MOSA utilizou uma potência média de 665 KW e o ARMOGA usou uma potência média de 595 KW. Observa-se também que todos os métodos tiveram uma potência requerida menor que 815 KW, para manter a temperatura do óleo acima de 30°C, uma diminuição na potência requerida, e com isso, um menor custo operacional. Nota-se que a espessura média do polipropileno combinado com a lã mineral, apresentou uma diminuição significativa.

#### 5.2.3.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

Observando a figura 5.22, nota-se que o ARMOGA apresenta um número menor de soluções em relação aos outros métodos de otimização. Porém, suas soluções são melhores ou iguais aos outros dois métodos. Uma alternativa para encontrar a soluções seria o emprego de superfície de respostas, mas para gerar e determinar essa superfície de resposta seria necessário deixar o programa rodar dezenas de vezes e ainda precisaria de tempo para encontrar as melhores superfícies de respostas.

Nota-se também que o MOGT e MOSA apresentaram suas soluções bem próximas das soluções do ARMOGA quando utilizado a combinação do polipropileno com a lã mineral como materiais isolantes, o que aconteceu quando utilizado, separadamente, a lã mineral e o polipropileno. Por isso que no caso em que a camada isolante fosse constituída da combinação do polipropileno combinado com a lã mineral, as soluções geradas pelo MOGT também seriam aceitáveis. De acordo com todos os resultados apresentados o qualquer um dos três métodos seriam uma boa opção para os materiais isolantes utilizados.

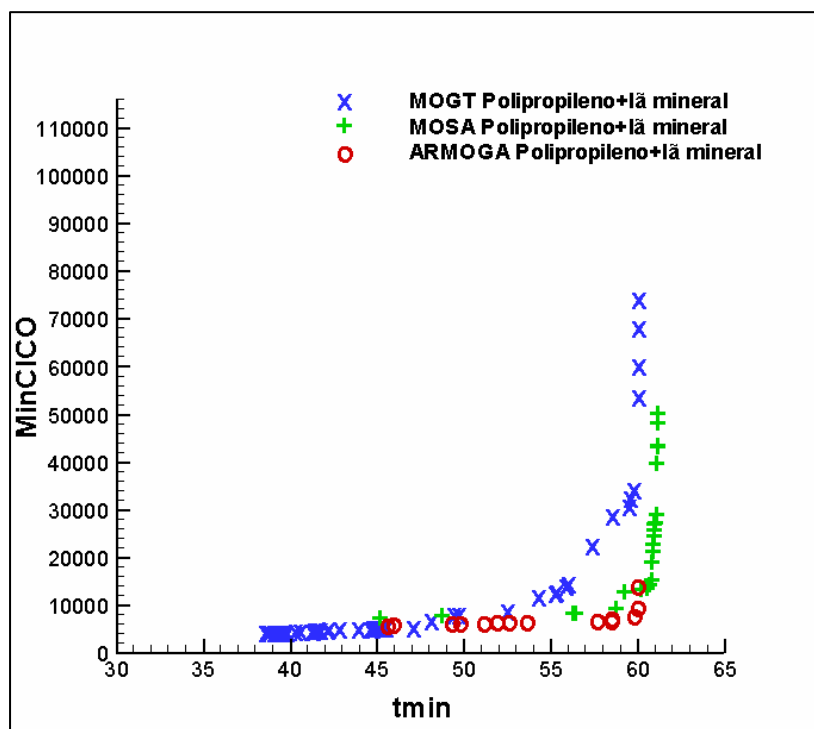
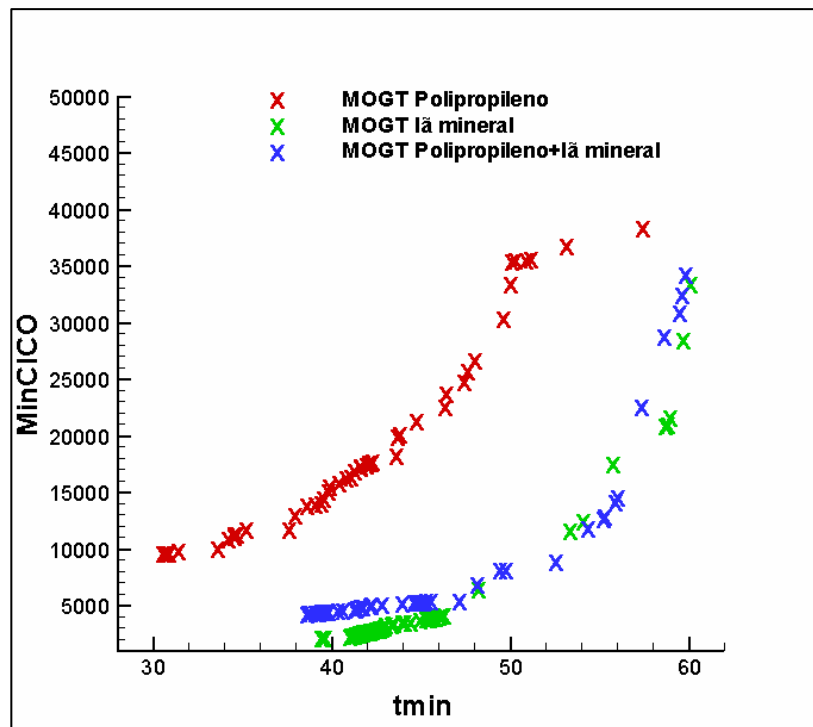


FIG.5.23. Comparação entre os métodos de Otimização.

### 5.3. COMPARAÇÃO ENTRE OS MATERIAIS ISOLANTES

Nas figuras 5.23 a 5.25 encontra-se a comparação envolvendo todos os materiais isolantes utilizados na otimização do problema, sendo utilizadas apenas as soluções não dominadas, ou seja, as melhores soluções que foram encontradas pelo três métodos de otimização utilizados. De acordo com os resultados gerados, a melhor opção para a camada isolante seria a combinação do polipropileno com a lã mineral, pois suas soluções são melhores ou iguais as dos outros dois materiais isolantes, com os menores custos e ainda podendo aproveitar os pontos positivos dos dois materiais.

Nota-se que de acordo com o método de otimização, encontra-se uma variação das soluções entre os materiais isolantes, pois utilizando o MOGT têm-se soluções bem próximas para a lã mineral e para a combinação do polipropileno com a lã mineral. Já para o MOSA e o ARMOGA têm as soluções para a lã mineral e para a combinação do polipropileno com a lã mineral bem distantes umas das outras. Em relação, ao polipropileno tem as soluções bem afastadas dos outros materiais isolantes, para todos os métodos de otimização.



**FIG .5.24.** Análise entre os métodos materiais isolantes utilizando o MOGT.



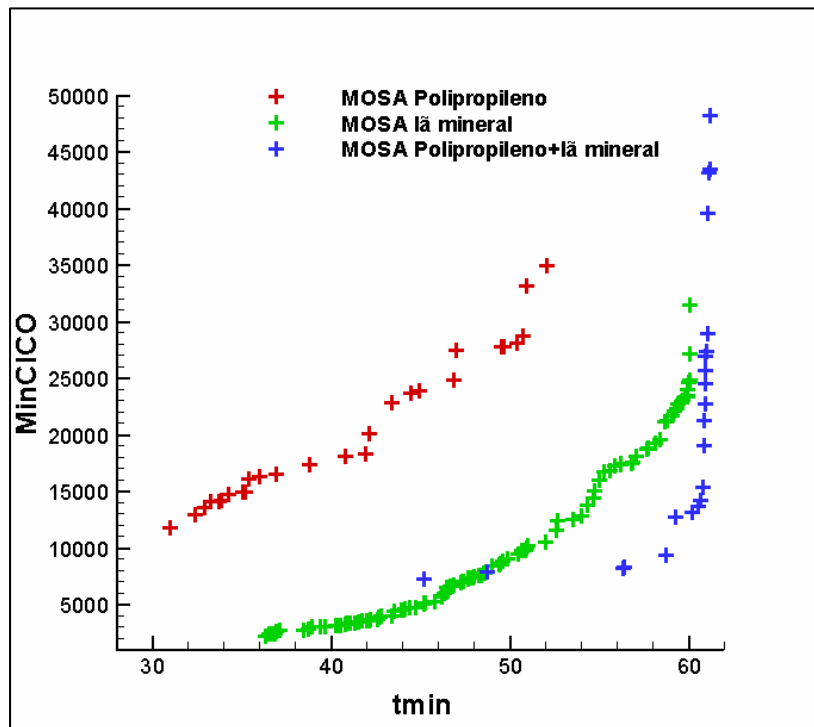


FIG. 5.25. Análise entre os métodos materiais isolantes utilizando o MOSA.

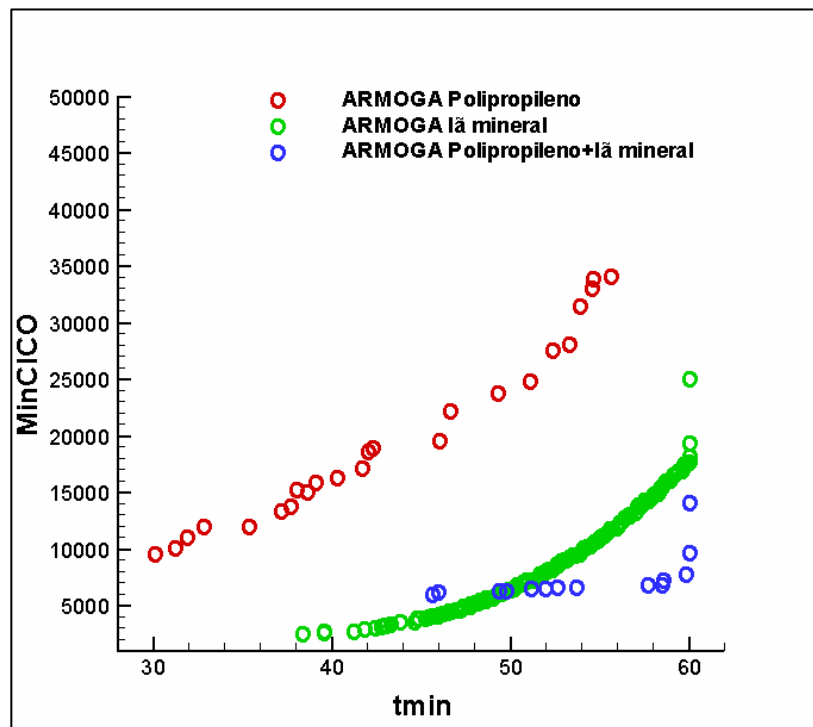


FIG. 5.26. Análise entre os métodos materiais isolantes utilizando o ARMOGA.

## CAPÍTULO 6

### 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste trabalho, é desenvolvido um estudo analítico-numérico de transferência de calor em coordenadas cilíndricas com geração de calor, visando as suas aplicações na produção de petróleo e gás natural em águas profundas, no caso mais crítico, sob o ponto de vista da formação de hidratos, ou seja, em uma parada de produção. É proposto uma otimização do sistema pipe-in-pipe, em que foram otimizadas a espessura da camada isolante, a posição e a intensidade dos aquecedores elétricos, com o objetivo de maximizar a temperatura mínima do óleo durante a parada de produção e minimizar o custo de instalação do material isolante e o custo de operação dos aquecedores elétricos. Para essa tarefa, foram utilizado três métodos de otimização multi-objetivo: o Multi Objective Game Theory (MOGT), Muti Objective Simulated Annealing (MOSA) e Adaptive Range Muti-Objective Genetic Algorithm (ARMOGA) provido pelo modeFrontier® software. Devido às propriedades termofísicas de um material isolante escolhido a solução numérica teve um custo computacional muito grande, por isso, foram realizadas pesquisas entre as superfícies de respostas para encontrar a superfície.

Baseado nas análises e resultados apresentados nos capítulos anteriores, as seguintes conclusões são obtidas:

1. Todos os métodos de otimização empregados apresentaram soluções bem próximas, mesmo apresentando distintos valores para cada variável otimizada.
2. É mostrado que os aquecedores elétricos mesmo livres apresentaram soluções mais econômicas que as outras soluções apresentadas por outros autores, tendo os aquecedores simétricos. Porém, em muitas soluções os aquecedores livres tenderam a simetria.
3. O polipropileno como material isolante apresentou o custo mais elevado. Já a lã mineral obteve os menores custos, sendo esta uma boa alternativa econômica para a produção de petróleo. Uma melhor alternativa, mostrada nesse trabalho,

seria uma combinação do polipropileno com a lã mineral, apresentando um custo mediano em relação aos outros materiais isolantes.

4. A combinação entre as superfícies de respostas Processos Gaussianos, para a temperatura mínima do óleo  $t_{min}$ , foi a melhor opção para a otimização utilizando a superfície de resposta, apresentando um erro inferior a 11%.
5. O tempo de CPU para a Fronteira de Pareto proporcionada pelos métodos de otimização utilizando superfície de respostas, foram em torno de segundos. Já aplicando a otimização sem superfície de resposta esse tempo foi de aproximadamente alguns dias. Porém, para comparar as soluções encontradas pelas superfícies de resposta com as soluções reais, precisa de aproximadamente um dia para essa comparação e ainda essas soluções apresentam um erro considerável aceitável.
6. As espessuras das camadas isolantes apresentaram valores bem distintos para cada material (lã mineral, polipropileno e polipropileno com a lã mineral), sendo influenciadas pelos aquecedores elétricos.

A fim de dar continuidade ao presente trabalho, as seguintes sugestões são propostas para trabalhos futuros:

1. Otimizar o problema utilizando um método mono-objetivo e comparar o resultado com os métodos multi-objetivos.
2. Utilizar outros materiais isolantes e menos aquecedores elétricos, a fim de minimizar os custos.
3. Analisar o problema com o fluido escoando e, em seguida, fazer a otimização da espessura da camada isolante da posição e da potência dos aquecedores elétricos.
4. Adicionar o air-gap para uma análise da convecção natural nas cavidades anulares, com o objetivo de estudar a influência desta camada no desempenho térmico do conjunto.
5. Desenvolver uma metodologia experimental para análise térmica de sistemas PiP. Esta análise consiste da validação dos modelos numéricos desenvolvidos e da simulação experimental da transferência de calor em seções típicas de sistemas pipe-in-pipe;

## CAPÍTULO 7

### 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, TANNHILL E PLETCHER, **Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer**, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1984.
- ARAKAWA, M. AND HAGIWARA, I., **Development of Adaptive Real Range (ARRange) Genetic Algorithms**, JSME Intl. J., Series C, Vol. 41, No. 4 , pp. 969-977, 1998.
- ARAKAWA, M. AND HAGIWARA, I., **Nonlinear Integer, Discrete and Continuous Optimization Using Adaptive Range Genetic Algorithms**, Proc. of 1997 ASME Design Engineering Technical Conferences, 1997.
- BLEULER S., LAUMANNNS M., ZITZLER E., PISA-A platform and programming language independent interface for search algorithms, In: CARLOS M. FONSECA, PETER J. FLEMING, ECKART ZITZLER, KALYANMOY DEB AND LOTHAR THIELE (editors), **Evolutionary Multi-Criterion Optimization**. Second International Conference, EMO 2003, Springer. Lecture Notes in Computer Science, Faro, Portugal, v. 2632, p. 494-508, 2003.
- BOATMAN, M. AND PETERSON, J., **Oceanic Gas Hydrate Research and Activities Review**, US Department of the Interior, Minerals Management Service, Gulf of Mexico OCS Region, OCS Report MMS 2000-017, 2000.
- BOX, G. E. P., HUNTER, W. G., HUTER, J. S. - **Statistics for experimenters**. USA: John Wiley & Sons, 1978.)
- CHURCHILL, S. W., & BERNSTEIN, M.. A correlating equation for forced convection from gases and liquids to a circular cylinder in crossCow. Journal of Heat Transfer, 99, 300–306, 1977.
- CLARICH A., RIGONI E., POLONI C., **A new Algorithm based on Game Theory for Robust and Fast Multi-Objective Optimisation**, ESTECO Ltd, Trieste, Italy, 2003.
- CREEK J.L., LUND H.J., BRILL J.P., VOLK M., **Wax deposition in single phase flow, Fluid Phase Equilibr.** 158–160 , 801–811, 1999.
- DEB, K., **Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms**, John Wiley & Sons, New York (2001).

- ESAKLUL K. A., FUNG G., HARRISON G. E PEREGO R, **Active Heating For Flow Assurance Control in Deepwater Flowlines**, Paper OTC 15188, Offshore Technology Conference, Houston Texas., 2003.
- FORTUNA, A. O., **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos: Conceitos básicos e aplicações**, São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, 2000.
- HANSEN A. B., E DELESALLE A., **Cost-Effective Thermal Insulation Systems for Deep water west Africa in Combination with Direct Heating**, Offshore West Africa Conference Exhibition, March 21-23, Abidjan 2002
- HAUSNER, M., DIXON, M., **Optimized Design of Pipe-in-pipe Systems**, Paper OTC 14182, Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 2002.
- JALURIA, Y., **Design and Optimization of Thermal System**, 1998.
- JASZKIEWICZ A., **Comparison of local search-based metaheuristics on the multiple objective knapsack problem**, *Foundations of computer and decision sciences*, vol. 26, no. 1, pp. 99–120, 2001.
- KAUFMAN M. D. **Variable-Complexity Response Surface Approximations For Wing Structural Weight In Hsct Design**, Faculty Of Virginia Polytechnic Institute, 1996.
- KEVIN I. SMITH, RICHARD M. EVERSON, *Member, IEEE*, JONATHAN E. FIELDSEND, *Member, IEEE*, Chris Murphy, and Rashmi Misra, **Dominance-Based Multi-Objective Simulated Annealing**, 2007
- KIRKPATRICK S., GELATT C., AND VECCHI M., **Optimization by simulated annealing**, *Science*, vol. 220, pp. 671–680, 1983.
- KULLMANN, D. H., **Estudo Analítico-Numérico de Transferência de calor em dutos com aquecimento ativo na parede**, COPPE-UFRJ, 2006.
- LAOUIR, NOUREDDINE AND DENNIEL, SYLVAIN, **Heated PiP: Combining Passive Insulation and Active Heating for Enhanced Thermal Performance**. Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering – OMAE 2001, pp. 149 – 156, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, June 3-8, 2001.
- MASOOD, K., *INT.J.* **Recovery and regularization of initial temperature distribution in a two-layer cylinder with perfect thermal contact at the interface**. Vol 92. Pp. 224-231, 2006.
- METROPOLIS N., ROSENBLUTH A., ROSENBLUTH M., A. H. TELLER, AND E. TELLER, **Equation of state calculations by fast computing machines**, *Journal of Chemical Physics*, vol. 21, pp. 1087–1092, 1953.
- MOLLISON, M. I., **Pipe –in –Pipe Insulation System Passes Tests for Rell Lay**, Oil & Gas Journal, May 11, 1992.

- MORKHATAB S., WILKENS R. J. E LEONTARITIS K. J., **A Review of Strategies for Solving Gas-Hydrate Problems in Subsea Pipelines**, Energy Sources, Part A, 29:39–45, 2007.
- NASH, J., **Equilibrium points in n-person games**, In: Proceedings of the National Academy of the USA, 36(1):48–49, 1950.
- NETTO, T. A., SANTOS, J. M. C., AND ESTEFEN, S. F., **Sandwich Pipes for Ultra-deep Waters**. Proceedings of the 4th International Pipeline Conference, PP. 2093-2101. Calgary, Canada, September 29-October 3, 2002.
- NUTTAL, R. H. AND ROGERS, M. G., **Insulated Pipe-in-Pipe Subsea Hydrocarbon Flowlines**, Paper 0610, OMAE 1998.
- POLES S., **An improved Multi-Objective Genetic Algorithm**, ESTECO Ltd, Trieste, Italy, 2003.
- OYAMA, A., OBAYASHI, S., NAKAHASHI, K. AND HIROSE, N., **Aerodynamic Wing Optimization via Evolutionary Algorithms Based on Structured coding**, CFD Journal, Vol. 8, No. 4, pp. 570-577, 2000.
- ÖZISIK, M. N., **Heat Conduction**, John Wiley & Sons, New York, 1980.
- RIGONI E., **Multi Objective Simulated Annealing**, ESTECO Ltd, Trieste, Italy, 2003.
- SASAKI D., **Adaptive Range Multi-Objective Genetic Algorithm**, ESTECO Ltd, Trieste, Italy, 2003.
- SILVA W.B. E COLAÇO M. J., **A Multi-Objective Optimization Of Active Heating in Pipe-in-Pipe Systems Based on Game Theory**, EMC, Friburgo RJ, 2007.
- SU, J, AND CERQUEIRA, D. R.. **Simulation of transient heat transfer in multilayered composite pipeline**. In: Proceedings of 20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE01/PIPE–4126, Rio de Janeiro, Brazil, 2001 .
- SU, J., CERQUEIRA, D. R. AND ESTEFEN, S. F., **Thermal analysis of sandwich pipes with active electrical heating**. In: Proceedings of 22nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering ,OMAE Cancun, Mexico, 2003.
- SU, J., CERQUEIRA, D. R. AND ESTEFEN, S. F. **Simulation of transient heat transfer of sandwich pipes with active electrical heating**, Trans. ASME, J. Offshore Mech. Artic Eng., 127:366–370, 2005.
- SU, J., REGIS, C. R. AND BOTTO, A., **Thermal analysis of combined active heating and passive insulation of deepwater pipelines**. In: Proceedings of 21th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering ,OMAE, Oslo, Norway, 2002.
- SUNDARARAJAN S., KEERTHI S.S., **Predictive approaches for choosing hyperparameters in artificial neural network**, To be Submitted to IEEE Trans. On Neural Networks, 1999.

- SUNDARARAJAN S., KEERTHI S.S., **Predictive approaches for choosing hyperparameters in Gaussian Processes**, Accepted for the conference on Advances in Neural Networks Information Processing Systems (NIPS 12), 1999.
- SURYANARAYANA N.V., **Forced Convection-external Flows**, The CRC Handbook of Thermal Engineering, Franle Ureith, CRC Press, 2000.
- TEIXEIRA, A., **Estudo Sobre a Deposição de Parafina em Linhas de Petróleo**, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-RIO, 2004.
- TOUGH, G., DENNIEL, S., AL SHARIF, M. AND HUTHISON, J., **BP Nile-Design and Qualification of Reeled Pipe in Pipe for Deepwater**, Paper OTC 13257, Offshore Technology Conference, Houston Texas, 2001.
- ULUNGU E.L., TEGHEM J. & OST CH. **Efficiency of interactive multi objective simulated annealing through a case study**, *Journal of the Operational Research Society*, vol.49, pp. 1044-1050, 1998.
- UREITH F., **CRC Handboole of Thermal Engineering**, CRC Press, 2000.FONSECA AND FLEMING, **Genetic Algorithms for Multi-objective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization**, In Proc of 5<sup>th</sup> Conference an Genetic Algorithms, pp 416-423, 1993.
- URDAHL O., BOERNES A. H., HARRISON G., KINNARI K. J., HOLME R, **Operation Experience by Applying Direct Electrical Heating for Hydrate Prevetion**, Paper OTC 15189, Offshore Technology Conference, Houston Texas., 2003.

## **8 ANEXOS**



## ANEXO 01

### COEFICIENTE DE TROCA DE CALOR POR CONVECÇÃO

Para encontrar o coeficiente de troca de calor por convecção para o problema de pipe-in-pipe em águas profundas, é necessário o cálculo de número de Reynolds (Re). Re é um número adimensional usado em mecânica dos fluidos para o cálculo de regime de escoamento de um determinado fluido sobre uma superfície (Suryanarayana, 2000). Seu significado físico é um quociente de forças: Forças de inércia ( $v\rho$ ) entre as forças de viscosidades  $\left(\frac{\mu}{D}\right)$ . O número de Reynold é expresso por:

$$\text{Re} = \frac{v\rho D}{\mu} \quad (\text{AI.1})$$

Onde:

$v$  - Velocidade média do fluido

$D$  - diâmetro para o fluxo no tubo

$\mu$  - Viscosidade do fluido

$\rho$  - densidade do fluido

Pois, de acordo, com o número de Reynold, pode-se fazer uma correlação com o coeficiente de troca de calor por convecção. Utilizando a seguinte correlação proposta por Churchill and Bernstein (1977):

$$\text{Re}_d > 400: \quad Nu_d = 0.3 + \frac{0.62 \text{Re}_d^{\frac{1}{2}} \text{Pr}^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{\text{Pr}}\right)^{\frac{2}{3}}\right]^{\frac{1}{4}}} \left[1 + \left(\frac{\text{Re}_d}{282}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}} \quad (\text{AI.2})$$

$$10000 < Re_d < 400: \quad Nu_d = 0.3 + \frac{0.62 Re_d^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{Pr}\right)^{\frac{2}{3}}\right]^{\frac{1}{4}}} \left[1 + \left(\frac{Re_d}{282}\right)^{\frac{1}{2}}\right] \quad (AI.3)$$

$$Re_d < 10000: \quad Nu_d = 0.3 + \frac{0.62 Re_d^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{Pr}\right)^{\frac{2}{3}}\right]^{\frac{1}{4}}} \quad (AI.4)$$

Para encontrar o valor do Reynolds para o problema foi utilizado  $\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$ ,

$$\mu = 1 \times 10^{-3} \frac{kg}{m.s}, D=0.254 \text{ m}, v = 1 \frac{m}{s}, k=0.5 \frac{W}{m^{\circ}C} \text{ e } Pr=7.$$

A partir daí, encontra-se o valor do número de Nusselt (Nu) e, com isso consegue-se encontrar o valor do coeficiente de trocar de calor por convecção, de acordo com a equação abaixo:

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (AI.5)$$

Onde:

Nu = número de Nusselt;

h = coeficiente de convecção;

L = comprimento característico do tubo;

k = coeficiente de condutividade térmica do fluido

Os dados utilizados para encontrar o coeficiente de convecção são valores aproximados. Logo, o valor do coeficiente de convecção utilizado nesse trabalho, será considerado alto, do ponto de vista de engenharia, porém torna o calculo mais conservativo. Ou seja, a temperatura do petróleo vai ser sempre mais baixa que a temperatura real do fluido, caso todas as outras condições sejam iguais e somente o h seja diferente.

