

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DE UM CICLO RANKINE ORGÂNICO REGENERATIVO ABERTO PARA DIFERENTES TEMPERATURAS SUPERCRÍTICAS

AUTOR – leonardo_silva756@hotmail.com
ORIENTADOR - douglas.fumes@hotmail.com
Faculdade Galileu

1. INTRODUÇÃO

Hodiernamente, é possível observar, em escala global, uma significativa intensificação das discussões acerca das ações do homem e seus efeitos colaterais no meio ambiente. Pesquisadores do mundo todo reiteram que, a criação de máquinas e equipamentos isentos de emissão de compostos poluentes são de extrema relevância e convergem para a redução dos impactos ambientais causados pela ação humana, Norgate et al. (2006) dizem que a crescente busca pelo conceito de desenvolvimento sustentável vem forçando uma melhoria da eficiência da utilização de recursos e, reduzir consideravelmente a geração de resíduos e emissões. Dentro desse contexto, torna-se factível o desenvolvimento de métodos de geração de energia não prejudicial ao meio ambiente, vislumbrando também, uma forma de aumentar a eficiência térmica.

Frente a estes desafios uma tecnologia renovável que é proposta é o Ciclo Rankine Orgânico (ORC). Segundo Javanshir e Sarunac (2017), o ORC tem um potencial significativo na conversão de energia. A particularidade deste modelo consiste na utilização de fluidos orgânicos (refrigerantes, em maior parte) como fluido de trabalho ao invés de água, como no ciclo Rankine convencional. Desta forma, o calor de entrada requerido para o ORC é inferior, tornando possível a utilização de fontes de energia renováveis para aquecimento do fluido de trabalho, promovendo a redução da emissão de poluentes ou até mesmo a anulação completa que ocorreria na queima de combustíveis ou outras formas de adição de calor hostis ao meio ambiente em um ciclo Rankine padrão.

Os principais tipos de ciclo Rankine são os subcríticos, subcríticos com superaquecimento e os supercríticos. A eficiência nos ciclos supercríticos é maior do que

nos demais e este fato gera novas fronteiras na investigação de aplicações de ORCs, Karellas et al. (2012).

De forma a aumentar a eficiência térmica do ciclo, torna-se interessante a adição de um regenerador aberto ao sistema, proporcionando um pré-aquecimento ao fluido de trabalho na saída da bomba de baixa pressão. Moran et al. (2005) mencionam que o processo de regeneração promove um aumento na temperatura média no componente de fornecimento de calor, necessitando assim de menos calor de entrada no ciclo e aumentando a eficiência térmica.

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise termodinâmica do comportamento de um ciclo Rankine orgânico supercrítico com regenerador de modo a variar os parâmetros de entrada (temperatura e pressão) e avaliar os resultados de eficiência térmica do ciclo (ETC) e do trabalho líquido específico (TLE), fazendo assim, uma modelagem matemática para obtenção dos resultados de ETC e TLE. Para realização da análise, serão considerados fluidos isentrópicos, secos e molhados pré-selecionados de acordo com seus baixos potenciais de degradação ambiental.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Ciclo Rankine Organico (ORC)

Nos últimos anos, o Ciclo Rankine Orgânico tem se tornado um processo de produção de energia bem popular, onde se é utilizado um fluido orgânico como fluido de trabalho, isto fornece a possibilidade de usar uma fonte menor de calor de entrada Karellas e Schuster (2008).

Quoilin et al. (2013) dizem que o ORC é uma tecnologia que não pode ser negligenciada, com por exemplo, a conversão de fontes de calor em energia renovável, incluindo principalmente as fontes geotérmicas, biomassas e solares.

2.1.1 Ciclo Rankine Organico Regenerativo

A utilização do regenerador para pré-aquecer o fluido de trabalho antes da entrada na caldeira é um método de aumentar a eficiência térmica e diminuir o calor de entrada

necessário. Imran et al. (2014) em sua pesquisa, encontrou que a eficiência do ORC regenerativo foi maior do que a do ORC convencional.

Pei et al. (2010) adotaram um ciclo orgânico regenerativo em sua pesquisa. Os resultados encontrados demonstram um efeito positivo dos estágios de sangria da turbina na eficiência do ciclo.

O pré-aquecimento do fluido de alimentação proporciona um aumento da eficiência térmica, tendo em vista que a troca de calor para o fluido de trabalho na caldeira acontece em uma temperatura consideravelmente baixa. Fumes (2020)

2.1.2 Ciclo Rankine Supercrítico

Diferente do ORC convencional, o ciclo Rankine supercrítico faz a transformação do fluido de trabalho em vapor no aquecimento de forma instantânea devido a sua alta pressão, trabalhando fora da área de mistura do gráfico T-s. Segundo Chen et al. (2011), quando o fluido de trabalho é aquecido diretamente do estado líquido para o estado supercrítico, contornando assim a região das duas fases, uma melhor combinação térmica é atingida com a fonte de calor, resultando em menos destruição de energia.

Schuster et al. (2010) diz que a pesquisa sobre os parâmetros supercríticos dos fluidos é de alta importância, partindo do pressuposto de que os mesmos podem levar a maiores eficiências, tornando as plantas ainda mais atraentes para aplicação de calor residual.

Vidhi et al. (2014) em sua pesquisa, notaram que os fluidos orgânicos possuem uma maior eficiência em ciclos Rankine supercríticos do que os subcríticos devido ao perfil de aquecimento, melhorando assim a troca de calor.

2.2 Seleção de fluidos

Uma cuidadosa seleção de fluidos é necessária para atingir a mais alta eficiência térmica e maximizar a utilização da fonte de calor. Pedro Mago et al. (2008) dizem que a seleção de fluidos orgânicos deve ser feita baseando-se na segurança e técnica de viabilidade.

Wang et al. (2011) em seu trabalho, fizeram uma seleção de fluidos, analisando o sistema e os parâmetros de operação necessários, como pressão, temperatura de saturação e condensação, para criar um modelo matemático que foi desenvolvido no Matlab e calculado no REFPROP.

Em sua seleção, Drescher e Bruggemann (2007), definiu dois principais parâmetros que são temperatura mínima e máxima de trabalho, onde, o limite máximo de temperatura é a estabilidade do fluido e compatibilidade do material. Um limite de toxibilidade também foi considerado como 50 ml/m³.

Bertrand et al. (2009) levou em consideração a possível degradação ambiental. Fluidos com altos níveis de ODP e GWP não foram selecionados para análise. Uma relação com a viabilidade econômica também foi feita mostrando que a má seleção pode acarretar a altos custos operacionais.

Rayegan e Tao (2011) fez uma seleção preliminar descartando fluidos não seguros para a camada de ozônio e que foram banidos pelo protocolo de Montreal. A seleção principal foi passar os fluidos por um fluxograma com algumas etapas, onde existiam requisitos que necessitavam ser atendidos.

De acordo com Javanshir e Sarunac (2017) a relação entre a temperatura de entrada da turbina e a eficiência térmica depende do fluido utilizado. Fluidos secos não necessitam de uma alta temperatura de entrada, já os molhados o aumento da temperatura eleva a eficiência térmica, fluidos isentrópicos demonstram uma maior eficiência que os demais por não ter uma dependência significativa da temperatura de entrada na turbina.

2.3 Aumento de eficiência térmica em um ciclo Rankine

Há várias maneiras de maximizar a eficiência térmica de um ciclo Rankine. Em sua pesquisa, Chys et al (2012) utilizaram como fluido de trabalho misturas zeotrópicas, que com um efeito positivo produziu um aumento de 15,7% na eficiência do ciclo.

Segundo Xi et al (2013) a modificação do ciclo com trocadores de calores internos e externos, regeneradores, turbinas de estágios, devem ser analisados e comparados com o ciclo Rankine básico. A recuperação do calor com um trocador interno antes do condensador para pré aquecer o fluido de trabalho na entrada na caldeira pode trazer uma melhora significativa na eficiência térmica do ciclo.

3. METODOLOGIA

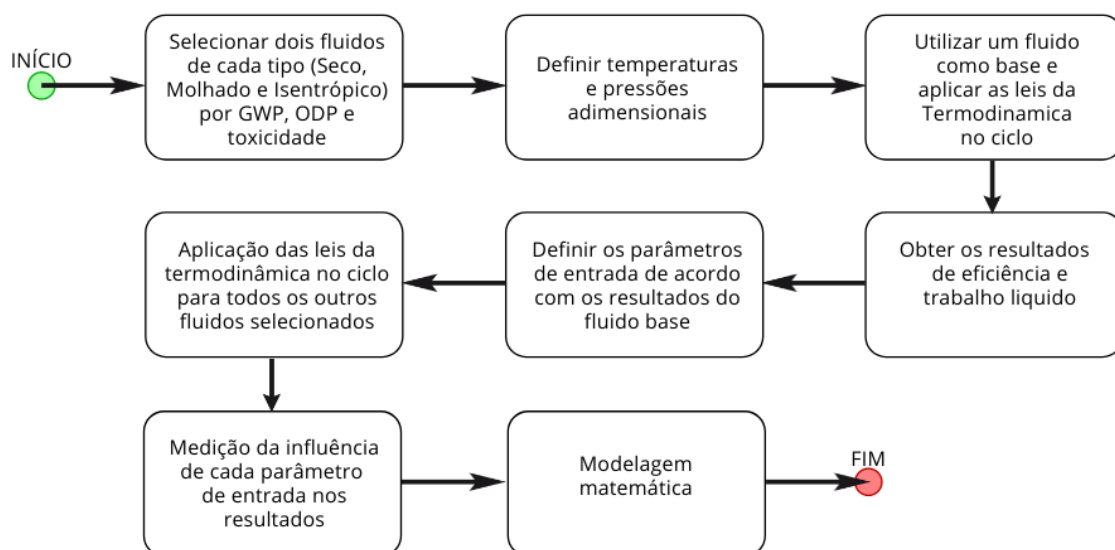


Figura 3.1 – Fluxograma da Metodologia. Fonte: Próprio autor (2022)

3.1 Pré-Seleção dos Fluidos

A pré-seleção de fluidos utilizada neste estudo foi com base no poder de degradação ambiental e as menores temperaturas críticas. O GWP (*Global Warming Potential*) e o ODP (*Ozone Depletion Potential*) são os indicadores de maior prioridade. Toxicidade, inflamabilidade e corrosividade também serão considerados, porém, de forma secundária. Desta forma escolhendo três fluidos de cada tipo sendo eles secos, molhados e isentrópicos.

A Tab.1 apresenta os fluidos de trabalho determinados para este estudo, junto à algumas de suas propriedades termodinâmicas.

Fluido	Tipo	$T_{cr}(^{\circ}C)$	$P_{cr}(MPa)$	GWP	ODP	Toxicidade	Inflamabilidade	Corrosividade
Isobutano	Seco	134,66	3,62	3	0	Não	Sim	Não
R236fa	Seco	124,92	3,20	1300	0	Não	Não	Não
R114	Seco	145,68	3,25	10,04	1	Não	Não	Não
R134a	Molhado	101,06	4,05	1300	0	Não	Não	Não
R152a	Molhado	113,26	4,51	140	0	Não	Sim	Não
Amônia	Molhado	132,25	11,33	0	0	Sim	Não	Sim
R123	Isentrópico	183,68	3,66	77	0,02	Sim	Não	Não
R142b	Isentrópico	137,11	4,05	1800	0,065	Sim	Sim	Não
R11	Isentrópico	197,96	4,40	4000	1	Não	Não	Não

Tabela 1. Fluidos selecionados. Fonte: Próprio autor (2022)

3.2 Temperatura e Pressão Adimensionais

O conceito de adimensionalidade utilizado por Javanshir e Sarunac (2017) permite fazer a comparação de fluidos que trabalham em diferentes faixas de temperatura e pressões críticas.

Essa analogia consiste em uma razão entre a temperatura de operação do fluido e a mesma em seu ponto crítico. Com a pressão acontece da mesma forma, assim temos as equações:

$$T_r = \frac{T}{T_{cr}} \quad (3.1)$$

$$P_r = \frac{p}{p_{cr}} \quad (3.2)$$

Utilizando as equações (3.1) e (3.2) obtemos uma taxa de operação. De acordo com Fumes (2020), é fundamental o uso da adimensionalidade na comparação de desempenho entre fluidos a partir de parâmetros de operação equivalentes, visando que fluidos orgânicos possuem propriedades muito particulares. Portanto, utilizar temperatura e pressão adimensional para a aplicação da primeira lei da termodinâmica no ciclo sempre será proporcional as propriedades do fluido.

A Tab. 2 demonstra os valores considerados para o ciclo termodinâmico deste estudo.

Ciclo	Evaporador		Regenerador	Condensador
Supercrítico	$P_r = 1,3$	$T_{r,1} = 1,2$	$P_{r,1} = 0,6$	20°C
		$T_{r,2} = 1,3$	$P_{r,2} = 0,65$	
		$T_{r,3} = 1,35$	$P_{r,3} = 0,7$	

Tabela 2. Parâmetros adimensionais de operação para o ciclo supercrítico. Fonte:
Próprio autor (2022)

3.3 Análise da obtenção das propriedades

Com base no diagrama T-s do ciclo Rankine supercrítico e regenerativo, podemos fazer uma análise da obtenção das propriedades, destrinchando desde a eficiência térmica até os parâmetros de entrada.

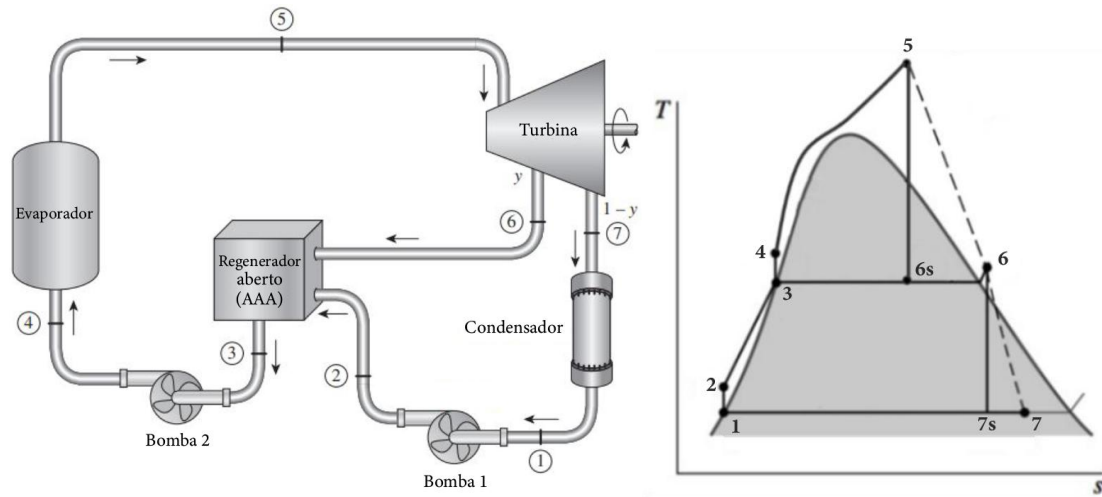


Figura 1. Ciclo Rankine supercrítico regenerativo. Fonte: Adaptado de Çengel e Boles (2013)

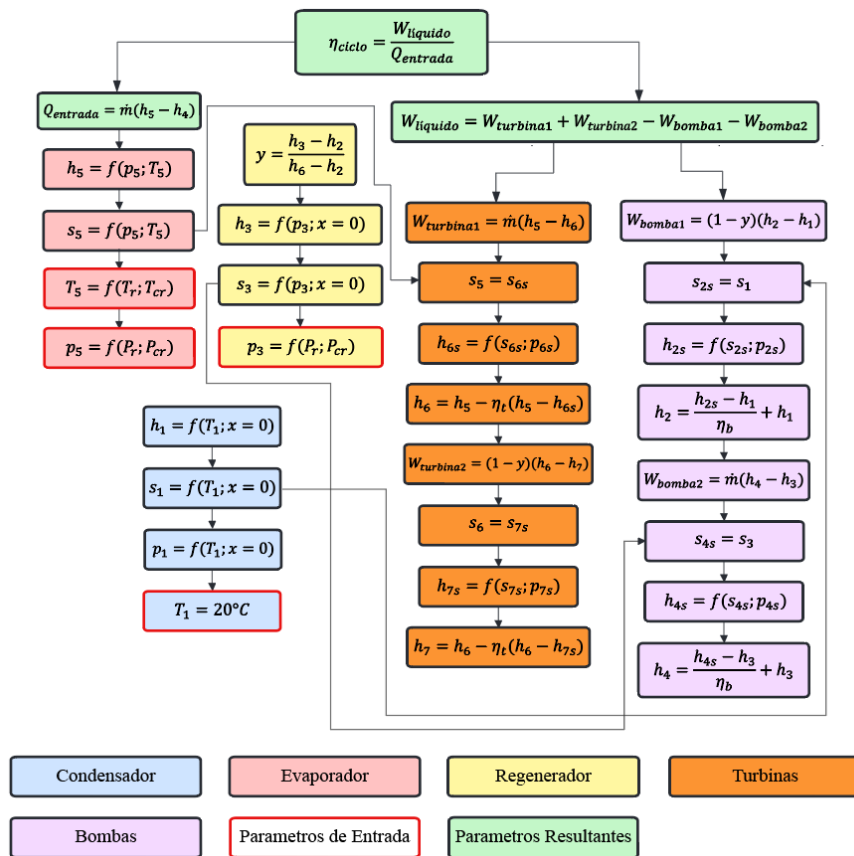


Figura 2. Fluxograma para obtenção das propriedades termodinâmicas. Fonte: Próprio Autor (2022)

3.4 Modelagem matemática

Após os cálculos dos trabalhos líquidos e eficiências de cada fluido e em cada variação de parâmetro, uma classificação será feita do mais eficiente para o menos eficiente. Com os dados obtidos,

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados dos Fluidos Secos

Os fluidos secos demonstram ter resultados mais estáveis de eficiência térmica, tendo uma amplitude de 2% em sua variação e ficando com média de 18,6%.

$T_r Evap$	$P_r Reg$	Isobutano		R236fa		R114	
		ETC	TLE	ETC	TLE	ETC	TLE
1,2	0,6	18,87%	48,52	17,76%	18,97	19,09%	18,99
	0,65	18,78%	45,50	17,43%	17,43	18,79%	17,64
	0,7	18,62%	42,49	17,10%	15,97	18,61%	16,49
1,3	0,6	19,05%	59,58	17,81%	22,94	19,08%	22,90
	0,65	18,95%	56,45	17,53%	21,39	18,87%	21,59
	0,7	18,81%	53,40	17,29%	19,95	18,71%	20,41
1,35	0,6	19,02%	64,01	17,77%	24,59	19,07%	24,58
	0,65	18,93%	60,89	17,49%	23,02	18,85%	23,24
	0,7	18,80%	57,80	17,24%	21,55	18,71%	22,07

Tabela 3. Resultados dos fluidos secos. Fonte: Próprio autor (2022)

4.2 Resultados dos Fluidos Molhados

Os fluidos molhados apresentaram variação média de eficiência, tendo a máxima de 21,17% com a Amônia na maior temperatura do evaporador, e a mínima de 15,11% com o R134a na menor temperatura do evaporador, gerando assim, uma amplitude de 4,33% e média de 18,63%.

$T_r Evap$	$P_r Reg$	R134a		R152a		Amônia	
		ETC	TLE	ETC	TLE	ETC	TLE

1,2	0,6	15,19%	17,72	17,04%	29,83	19,72%	118,55
	0,65	15,11%	16,61	16,87%	27,91	19,68%	112,75
	0,7	15,11%	15,61	16,84%	26,27	19,52%	106,32
1,3	0,6	16,02%	22,86	18,05%	38,51	20,78%	150,95
	0,65	16,00%	21,75	17,90%	36,45	20,75%	144,86
	0,7	15,96%	20,64	17,87%	34,72	20,63%	138,16
1,35	0,6	16,32%	24,94	18,39%	41,96	21,17%	163,52
	0,65	16,33%	23,83	18,25%	39,87	21,12%	157,13
	0,7	16,24%	22,64	18,20%	38,07	21,02%	150,47

Tabela 4. Resultados dos fluidos molhados. Fonte: Próprio autor (2022)

4.3 Resultados dos Fluidos Isentrópicos

Os fluidos Isentrópicos apresentaram a maior eficiência do estudo, atingindo a máxima de 27,22%, porém, foi o tipo de fluido mais instável, tendo uma amplitude dos seus resultados de 7,65%.

$T_r Evap$	$P_r Reg$	R123		R142b		R11	
		ETC	TLE	ETC	TLE	ETC	TLE
1,2	0,6	23,65%	31,06	19,69%	27,35	26,60%	33,62
	0,65	23,45%	29,21	19,65%	25,75	26,13%	31,22
	0,7	23,29%	27,48	19,57%	24,11	25,78%	29,08
1,3	0,6	23,68%	37,61	20,34%	34,17	27,11%	40,86
	0,65	23,51%	35,76	20,28%	32,48	26,66%	38,34
	0,7	23,38%	34,02	20,18%	30,73	26,34%	36,12
1,35	0,6	23,61%	40,38	20,50%	36,89	27,22%	43,86
	0,65	23,47%	38,56	20,44%	35,18	26,85%	41,40
	0,7	23,33%	36,79	20,33%	33,40	26,53%	39,13

Tabela 5. Resultados dos fluidos isentrópicos. Fonte: Próprio autor (2022)

4.4 Análise matemática dos resultados

Utilizando os resultados termodinâmicos obtidos, foi realizada uma análise de correlação linear entre os parâmetros de entrada com a eficiência térmica do ciclo (ETC) e trabalho líquido específico (TLE). A Tab.6 apresenta o resultado da correlação entre os parâmetros de entrada e os resultados do ciclo.

Categoria	Fluido	$T_{r,evap} \times TLE$	$P_{r,reg} \times TLE$	$T_{r,evap} \times ETC$	$P_{r,reg} \times ETC$
Seco	Isobutano	0,93	-0,36	0,59	-0,76
	R236fa	0,89	-0,46	0,15	-0,97
	R114	0,92	-0,40	0,13	-0,97
Molhado	R134a	0,96	-0,29	0,99	-0,06
	R152a	0,96	-0,29	0,99	-0,13
	Amônia	0,96	-0,27	0,99	-0,11
Isentrópico	R123	0,94	-0,35	0,06	-0,97
	R142b	0,94	-0,33	0,97	-0,18
	R11	0,91	-0,41	0,69	-0,72

Tabela 6. Resultados de correlação linear entre parâmetros de entrada e resultados de ETC e TLE. Fonte: Próprio autor (2022)

É possível observar uma forte correlação entre a temperatura do evaporador e o ETC em todos os fluidos do estudo. Nos fluidos molhados existe também uma correlação de 0,99 entre a temperatura do evaporador com a ETC. Valores pontuais de correlação foram evidenciados entre a pressão do regenerador e a ETC, entretanto, com proporcionalidade inversa, denotadas pelo sinal negativo, para os fluidos R236fa e R114.

A partir desses resultados, foram desenvolvidas regressões lineares múltiplas para quantificar a influência conjunta dos parâmetros de operação nos resultados de ETC e TLE, além de propiciar a construção de um modelo matemático para previsão dos resultados a partir dos parâmetros de operação selecionados. A Tab. 7 apresenta os resultados da estatística de regressão para TLE com T_r e P_r como variáveis de entrada.

Fluido	R- Múltiplo	R- Quadrado	R- Quadrado ajustado	Erro padrão
Molhado	0,9803	0,9610	0,9578	11,22720732
Seco	0,5687	0,3234	0,2670	14,34770328
Isentrópico	0,7218	0,5210	0,4811	3,661708545

Tabela 7. Resultados da regressão T_r e P_r para TLE. Fonte: Próprio autor (2022)

Da mesma forma, foi desenvolvida uma regressão linear para ETC com T_r e P_r como variáveis de entrada. Os resultados podem ser vistos na Tab. 8.

Fluido	R- Múltiplo	R- Quadrado	R- Quadrado ajustado	Erro padrão
Molhado	0,9935	0,9870	0,9859	0,002420817
Seco	0,7034	0,4948	0,4527	0,005081233
Isentrópico	0,9477	0,8981	0,8896	0,009017728

Tabela 8. Resultados da regressão T_r e P_r para ETC. Fonte: Próprio autor (2022)

4.5 Modelos Matemáticos

A partir dos resultados das regressões lineares desenvolvidas, é possível desenvolver expressões matemáticas que permitem obter os valores de ETC e TLE por meio dos coeficientes de cada parâmetro de entrada considerado acrescido de uma interseção algébrica. As expressões desenvolvidas para cada tipo de fluido podem ser vistas na Tab. 9.

Tipo de Fluido	Equação
Molhado	$TLE = -181,04 + 1,22T_r + 14,87P_r$
Isentrópico	$TLE = 19,48 + 0,103T_r - 3,12P_r$

Tabela 9. Modelos Matemáticos Desenvolvidos para Cálculo do TLE . Fonte: Próprio autor (2022)

Seco	$TLE = -96,52 + 0,11T_r + 49,94P_r$
Molhado	$ETC = 0,031 + 0,00097T_r + 0,0013P_r$
Isentrópico	$ETC = 0,034 + 0,0007T_r + 0,018P_r$
Seco	$ETC = 0,113 + 0,00033T_r + 0,0064P_r$

Tabela 10. Modelos Matemáticos Desenvolvidos para Cálculo da ETC. Fonte: Próprio autor (2022) .

5. CONCLUSÃO

Nove fluidos de diferentes tipos (secos, molhados e isentrópicos) foram adotados para o desenvolvimento desta pesquisa. Todos apresentaram alta correlação entre a temperatura de evaporação e o TLE do ciclo. Poucos casos (R236fa, R114 e R123) apresentaram elevada correlação entre a pressão de regeneração e a ETC, de forma proporcionalmente inversa, considerando o critério do coeficiente de Pearson.

Como pode ser visto na apresentação dos resultados, o erro padrão médio varia para os tipos dos fluidos. Para o cálculo do ETC, a média da maior variação dos resultados ocorreu com fluidos isentrópicos, chegando quase a 1%, resultado satisfatório mesmo sendo o mais volátil.

A modelagem matemática desenvolvida a partir do conceito de regressão linear múltipla permitiu a obtenção de resultados de ETC e TLE de forma objetiva e em alguns casos, com razoável precisão, de modo que, dentre os fluidos selecionados e faixas de operação pré-determinadas, apresentam aplicabilidade na obtenção simplificada dos resultados para o ciclo Rankine Orgânico Regenerativo.

No caso do TLE, o erro padrão apresentado pela estatística de regressão foi maior comparado com o do ETC. Torna-se assim, factível uma análise com outros parâmetros de entrada, tendo em vista que, o alto erro padrão demonstra que os parâmetros escolhidos não possuem, de forma predominante, influencia no TLE, deixando uma necessidade de continuidade de pesquisa para o mesmo.

REFERÊNCIAS

JAVANSHIR, A.; SARUNAC, N. **Thermodynamic analysis of a simple Organic Rankine Cycle**. Energy, Vol. 118, pp. 85-96. Jan. 2017.

FUMES, Douglas. **Um modelo termodinâmico para análise e seleção de um fluido de trabalho para um ciclo rankine orgânico com um aquecedor de fluido de alimentação aberto**. Bauru, 2020. Tese (Mestrado) - Faculdade de Engenharia da Unesp, Universidade Estadual Paulista “Júlio De Mesquita Filho” Campus de Bauru, 2020.

KARELLAS, S. et al. **Influence of supercritical ORC parameters on plate heat exchanger design**. Energy, Vol. 33-34, pp. 70-76. Fev. 2012.

QUOILIN, S. et al. **Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems**. Energy, Vol. 22, pp. 168-186. Jun. 2013.

IMRAN, M. et al. **Thermo-economic optimization of Regenerative Organic Rankine Cycle for waste heat recovery applications**. Energy Conversion and Management, Vol. 87, pp. 107-118. Nov. 2014.

CHEN, H. et al. **A supercritical Rankine cycle using zeotropic mixture working fluids for the conversion of low-grade heat into power**. Energy, Vol. 36, pp. 549-555. Jan. 2011.

SCHUSTER, A. et al. **Efficiency optimization potential in supercritical Organic Rankine Cycles**. Energy, Vol. 35, pp. 1033-1039. Feb. 2010.

KARELLAS, S; SCHUSTER, A. **Supercritical Fluid Parameters in Organic Rankine Cycle Applications**. Int. J. of Thermodynamics, Vol. 11, pp. 101-108. Sep. 2008.

PEI, G. et al. **Analysis of low temperature solar thermal electric generation using regenerative Organic Rankine Cycle**. Applied Thermal Engineering, Vol. 8-9, pp. 998-1004. Jun. 2010.

BERTRAND, T. et al. **Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle**. Applied Thermal Engineering, Vol. 29, pp. 2468-2476. Aug. 2009.

MAGO, P. et al. **An examination of regenerative organic Rankine cycles using dry fluids**. Applied Thermal Engineering, Vol. 28, pp. 998-1007. Jun. 2008.

WANG, E.H. et al. **Study of working fluid selection of organic Rankine cycle (ORC) for engine waste heat recovery**. Energy, Vol. 36, pp. 3406-3418. April. 2011.

VIDHI, R. et al. **Supercritical Rankine cycle coupled with ground cooling for low temperature power generation**. Energy Procedia, Vol. 57, pp. 524-532. Dec. 2014.

DRESCHER, U.; BRÜGGEMANN, D. **Fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) in biomass power and heat plants**. Applied Thermal Engineering, Vol. 27, pp. 223-228. Jan. 2007.

CHYS, M. et al. **Potential of zeotropic mixtures as working fluids in organic Rankine cycles**. Energy, Vol. 44, pp. 623-632. Aug. 2012.

XI, H. et al. **Parametric optimization of regenerative organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery using genetic algorithm**. Energy, Vol. 58, pp. 473-482. Sep. 2013.

MORAN, M. J.; AL, E. **Introdução à engenharia de sistemas térmicos termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor.** [s.l.] Rio De Janeiro Livros Técnicos E Científicos, 2005.

T.E. NORGATE. et al **Assessing the environmental impact of metal production processes.** Journal of Cleaner Production, Vol. 15, pp. 838-848. Oct. 2006.

ÇENGEL, Y.A.; BOLES, M.A. **Termodinâmica.** McGraw-Hill, São Paulo, Tradução da 7ª edição americana, 2013.