PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO

Oscar Juan Pablo Rodriguez Mejia

Simulation Model for a low grade waste heat recovery organic Rankine cycle

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Rio de Janeiro

April 2012

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

Oscar Juan Pablo Rodriguez Mejia

Simulation Model for a low grade waste heat recovery organic Rankine cycle

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Dissertation presented to the Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica of the Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio as partial fulfillment of the requirements for the degree of Mestre em Engenharia Mecânica.

Advisor: Jose Alberto dos Reis Parise
Co-Advisor: Samuel Fortunato Yana Mota

Rio de Janeiro
April 2012

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO

Oscar Juan Pablo Rodriguez Mejia

Simulation Model for a low grade waste heat recovery organic Rankine cycle

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Dissertation presented to the Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica of the Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio, as partial fulfillment of the requirements for the degree of Mestre.

Prof. Jose Alberto dos Reis Parise
Advisor
Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Sergio Leal Braga
Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Carlos Valois Maciel Braga
Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Frank C. Pruzaesky
Arcadis Logos S.A.

Prof. Carlos Eduardo L. Nobrega
CEFET/RJ

Prof. José Eugenio Leal
Coordinator of the Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 13/04/2012

Oscar Juan Pablo Rodriguez Mejia

The author graduated in Mechanical Engineering from Universidad Del Valle de Guatemala, Guatemala, in 2009.

Bibliographic data

Rodriguez Mejia, Oscar Juan Pablo

Simulation model for a low grade waste heat recovery organic Rankine cycle / Oscar Juan Pablo Rodriguez Mejia; advisor: Jose Alberto dos Reis Parise; co-advisor: Samuel Fortunato Yana Mota. – 2012.

75 f. : il.; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2012.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Ciclo orgânico Rankine. 3. Calor de rejeito. 4. Cogeração. 5. Modelagem. I. Parise, Jose Alberto dos Reis. II. Mota, Samuel Fortunato Yana. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

.

CDD: 621

To my dear parents Sergio and Juana, to whom I owe my entire work.

Acknowledgements

I would like to thank Professor Jose Alberto Parise for his trust and his support during the whole period of this work. I wish to thank him for the numerous moments spent working together on practical and theoretical issues as well as for countless valuable discussions.

Thanks are due to the graduate research entities CAPES, FAPERJ and CNPq for the financial support.

Resumo

Rodriguez Mejía, Oscar Juan Pablo; dos Reis Parise, Jose Alberto. **Modelagem de um ciclo orgânico Rankine com recuperação de calor de rejeito a baixa temperatura**. Rio de Janeiro, 2012. 75p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A presente dissertação trata do estudo de sistemas de potência baseados em ciclos Rankine orgânicos (ORC – Organic Rankine Cycle) acionados por energia térmica de rejeito. O objetivo é descrever mediante a simulação numérica um ciclo Rankine orgânico, dimensionar os trocadores de calor para o ciclo proposto e aplicar o conceito para sistemas de trigeração. Um modelo termodinâmico simples é apresentado, relacionando as características termodinâmicas do ciclo Rankine orgânico àquelas da corrente com rejeito térmico (como, por exemplo, vazão mássica, capacidade térmica e temperaturas de operação). A seguir, o método de multi-zonas, ou de fronteira móvel, é aplicado aos trocadores de calor do ciclo, condensador e caldeira, para dimensioná-los às condições do efluente de rejeito térmico. Na escolha do tipo de trocador de calor para a caldeira, é feita a distinção quanto à natureza do efluente, se gasoso ou líquido. No primeiro caso empregam-se trocadores de tubo e aleta e, no segundo, trocadores de placas. A solução numérica do sistema de equações algebraicas e obtida através de um programa computacional escrito em FORTRAN. São também estudados novos fluidos de trabalho de menor impacto ambiental e os resultados apresentados fazem uma comparação com fluidos de uso tradicional. As propriedades termodinâmicas e de transporte dos fluidos considerados foram obtidas usando o programa REFPROP 9.0 do NIST. Finalmente, o conceito do ciclo Rankine orgânico é aplicado a sistemas de trigeração, caracterizados pela produção simultânea de eletricidade, aquecimento e refrigeração.

Palavras-chave

Ciclo orgânico Rankine; calor de rejeito; cogeração; modelagem.

Abstract

Rodriguez Mejía, Oscar Juan Pablo; dos Reis Parise, Jose Alberto.

Simulation Model for a low grade waste heat recovery organic Rankine cycle. Rio de Janeiro, 2012. 75p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The present dissertation addresses the study of power generation systems based on organic Rankine cycles (ORC) driven by waste thermal energy (heat). A simple thermodynamic model is presented, relating the thermodynamic characteristics of the organic Rankine cycle to those of the waste heat flow (for instance: mass flow, thermal capacity and operation temperatures). Furthermore, the multi-zone, or movable boundary method is applied to the heat exchangers of the cycle, boiler and condenser, in order to size them for the waste heat flow conditions. In choosing the type of heat exchanger for the boiler, the distinction is made on the nature of the waste heat, either gaseous or liquid. New working fluids for the cycle, of less environmental impact, are studied. For the first case, tube and fin heat exchangers are considered, and in the second, plate heat exchangers. Finally, the concept of the organic Rankine cycle is applied to trigeneration systems, characterized by the simultaneous production of electricity, heating and cooling.

Keywords

Organic Rankine cycle; low grade waste heat; cogeneration; simulation.

Table of contents

List of figures

List of tables

NOMENCLATURE

A	Total heat transfer area	[m^2]
a	Area of exchangers using new organic substances divided by the area obtained using R134a	[-]
b	Mean channel spacing	[m]
Bo	Boiling number	[-]
COP	Coefficient of performance	[-]
c_p	Constant pressure specific heat	[kJ/kg·K]
D_h	Hydraulic diameter	[m]
d_i	Tube inside diameter	[m]
d_o	Tube outside diameter	[m]
$\dot{E}_{lo}$	Electricity power load	[kW]
ECR_{cv}	Energy conversion ratio of a conventional system	[-]
ECR_{tg}	Energy conversion ratio of a trigeneration system	[-]
F	Logarithmic mean temperature difference correction factor	[-]
Ge	Non-dimensional geometric parameter	[-]
G_f	Fluid mass flux	[kg/s·m^2]
$\dot{H}$	Energy rate equivalent of fuel consumption	[W]
h	Specific enthalpy	[kJ/kg]
k	Thermal conductivity	[kW/m·K]

$\dot{m}$	Mass flow rate	[kg/s]
Nu	Nusselt number	[-]
Pr	Prandtl number	[-]
$\dot{Q}$	Total heat transfer rate	[kW]
$q^{"}$	Heat flux	[kW/ m^2]
R_{EC}	Electricity-to-cooling load ratio	[-]
R_{HC}	Heating-to-cooling load ratio	[-]
R_{HE}	Heating-to-electric load ratio	[-]
Re	Reynolds number	[-]
U	Overall heat-transfer coefficient	[kW/m·K]
$\dot{W}$	Power output	[kW]

Greek Letters

α	Heat transfer coefficient	[kW/m·K]
α_{ec}	Fraction of energy rate equivalent of fuel consumption that goes to engine coolant	[-]
α_{es}	Fraction of energy rate equivalent of fuel consumption that goes to engine shaft power	[-]
α_{ex}	Fraction of energy rate equivalent of fuel consumption that goes to engine exhaust	[-]
β	Chevron angle	[radian]
γ	Void fraction of tube cross sectional area	[-]
δ	Liquid film thickness	[m]
η	Efficiency	[-]

ε_{ec}	Heat recovery efficiency of heat engine	[-]
θ	Dry angle	[radian]
μ	Dynamic viscosity	[Pa·s]
ρ	Density	[kg/m^3]
σ_L	Liquid surface tension	[N/m]
Φ_{ECR}	ECR ratio between trigeneration and conventional systems	[-]
φ	Ratio of the developed length to the projected length	[-]

Subscripts

cb	Convective boiling
cd	Condenser
cv	Conventional
ec	Economizer
ev	Evaporator
f	Fluid
fb	Boiler fuel consumption
fe	Engine fuel consumption
fu	Total fuel consumption
g	Gaseous
h	Heating
in	Input
l	Liquid
lo	Power load
nb	Nucleate boiling

out	Output
pb	Peak boiler
r	Refrigeration
sh	Superheater
$strat$	Stratified
tg	Trigeneration
v	Vapor
wf	Working Fluid

Acronyms

BPHE	Brazed plate heat exchanger
CCHP	Combined cooling, heat and power
ECON	Economizer
EVAP	Evaporator
ORC	Organic Rankine cycle
SUP	Superheater