

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE



**FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

**TITLE: QUANTUM THERMODYNAMICS OF HYBRID LIGHT-MATTER QUANTUM
SYSTEMS**

AUTHOR: Gabriel Alvarado Barrios

SUPERVISORS:

Juan Carlos Retamal Abarzua

Guillermo Esteban Romero Huenchuir

This thesis is presented as a part of the requirements for the conferral of the degree: Doctor en Ciencias Mención Física.

Santiago – Chile
2018

© **Francisco Dámaso Albarrán Arriagada, 2018.**

All rights reserved. Total or partial reproduction is prohibited without prior written authorization.

ABSTRACT

This thesis is focused on the study of quantum thermodynamical properties of hybrid light-matter quantum systems. In particular, we study the performance of thermodynamical cycles whose working substance can be described by the quantum Rabi model. We study the thermodynamical figures of merit for different intensities of the light-matter interaction. In addition we consider the role that quantum correlations may play in the performance of such devices. In terms of the light-matter interaction, we find that the ultra-strong coupling regime yields the best results. This regime is characterized by a coupling strength near to the relevant frequencies of the interaction, obtaining a hybrid system that mixed the light with the matter degrees of freedom called quantum Rabi system. These systems exhibit interesting properties, such as non-harmonic energy spectrum, and parity selections rules. Here, we focus on the role that these properties play in the performance of quantum heat engines.

In this work we develop four feasible experimental protocols to implement useful tools for quantum information. In the first place, we show how to generate states of high dimensionality and high entanglements using mainly the non-harmonicity of the quantum Rabi systems, showing the potential to generate non-trivial states in the light-matter systems. Secondly, we developed a protocol to simulate high spin systems, which opens the door to study complex models in physics. Third, we approach the problem to efficiently simulate the fermion lattice, obtaining an alternative form using fewer resources. Fourth, we propose a novel type of states with the properties of maximum persistence of entanglement and maximally connectedness, two very important characteristics in different computational tasks, such as one-way quantum computing.

This work starts with a brief introduction to the state-of-the-art of light-matter interactions, quantum information, quantum simulations and superconducting circuits. Following, we develop the four after mentioned proposal to improve quantum information tasks. Finally we gives some conclusions and perspectives about the present work.

Keywords: Quantum information, Quantum simulation, Superconducting circuits.

DEDICATION

DEDICATED TO THE PEOPLE WHO MADE OF ME WHAT I AM,
to my parents Yolanda Barrios & Luis Alvarado.

“And what are you gonna do, stab me?”
SOMEONE WHO IS NOW DEAD

Acknowledgement

I thank the unconditional support of my parents Yolanda and Luis. I am also deeply grateful for the emotional support and unconditional love of my girlfriend Daniela. I want to thank the support and dedication of my advisor Juan Carlos. Finally, I acknowledge the financial support from CONICYT Doctorado Nacional 21140432.

Table of Contents

ABSTRACT	i
DEDICATION	ii
1 Introduction	1
2 FUNDAMENTALS	3
2.1 Light-matter interaction	3
2.1.1 Quantum Rabi model	3
2.2 Quantum Computing	4
2.2.1 Quantum bit	4
2.2.2 Quantum gate	4
2.3 Quantum Simulation	4
2.3.1 Analog quantum simulation	4
2.3.2 Digital quantum simulation	4
2.4 Superconducting circuit	4
2.4.1 Spanning tree method	4
2.4.2 Josephson junction	4
2.4.3 Superconducting transmission line	4
2.4.4 Superconducting quantum interference device	4
2.4.5 Flux qubit	4
2.4.6 Charge qubit	4
BIBLIOGRAFA	1
APPENDIX	

List of Tables

List of Figures

Chapter 1

Introduction

Los motores trmicos, dispositivos que convierten energia calrica en energia mecnic, forman la mayor parte de los motores que se utilizan en la actualidad, desde generadores de energia motriz y generadores de energia elctrica hasta refrigeracin y bombas de calor. Los motores trmicos son un sistema esencial en termodinmica y estn intrnsecamente relacionados con la segunda ley. El desafo actual consiste en extender los principios de la termodinmica para incluir efectos cunticos que dominan a escalas pequeas y bajas temperaturas.

La mecnic cuntica ha sido usada para reintroducir los procesos dinmicos en la termodinmica. En particular, la teora de sistemas cunticos abiertos provee la estructura para separar el sistema de su ambiente. La ecuacin maestra Markoviana establecida por Lindblad y Gorini-Kossakowski-Sudarshan (LGKS generator) [**lindblad1976generators**, **gorini1976completely**], es uno de los elementos clave en la teora de la termodinmica cuntica [**alicki1979quantum**, **kosloff1984quantum**].

Un motor trmico termodinmico convierte la energia en forma de calor en trabajo mecnic mediante un gas o fluido de trabajo que se expande y empuja un pistn en un cilindro. Un motor de calor obtiene su energia a partir de reservorios trmicos a alta temperatura. Parte de la energia obtenida del reservorio es convertida en trabajo til. Sin embargo, debido a que un motor trmico no es perfectamente eficiente, parte de la energia tomada del reservorio no es convertida en energia mecnic, sino que es transferida a un reservorio de baja temperatura.

El importante trabajo de Scovil (1959) [**scovil1959three**] dio inicio al estudio de sistemas cunticos como sustancia de trabajo en motores trmicos, mostrando que el maser de 3 niveles puede comportarse como una mquina trmica regida por el ciclo de Carnot, introduciendo el trmino motor trmico cuntico. El estudio posterior en este campo se ha centrado principalmente en dos tipos de dispositivos: motores alternativos que utilizan el ciclo de Carnot o el ciclo de Otto, y motores continuos que se asemejan a Iseres y dispositivos de enfriamiento Iser. Un ciclo alternativo tpicamente esta particionado en cuatro segmentos, dos adiabticos, donde el sistema de trabajo es aislado del ambiente, y dos segmentos de transferencia de calor que pueden ser: isotrnicos en el caso del ciclo de Carnot [**lloyd1997quantum**, **bender2002entropy**, **quan2007quantum**], o isocricos en el caso del ciclo de Otto [**feldmann1996heat**, **feldmann2004characteristics**, **rezek2006irreversible**, **henrich2007quantum**, **allahverdyan2008work**, **wang2009thermal**, **thomas2011coupled**]. Los mismos ciclos fueron usados posteriormente en modelos para funcionamiento refrigerante [**rempp2007cyclic**, **rezek2009quantum**, **kaufman2012cooling**].

En Termodinámica cuántica, los procesos adiabáticos se modelan mediante Hamiltonianos dependientes del tiempo. Típicamente, el Hamiltoniano de control externo no conmuta con el Hamiltoniano interno. El requisito es una operación infinitamente lenta para que se satisfagan las condiciones adiabáticas cuánticas y termodinámicas. Bajo estas condiciones el ciclo del motor tiene potencia cero. Para generar potencia finita la velocidad de operación debe ser aumentada. Empíricamente, se sabe que un movimiento rápido conlleva pérdidas debido a la fricción. La descripción cuántica identifica la fuente de fricción en la incapacidad de que el sistema se mantenga diagonal en el cuadro instantáneo de energía [rezek2006irreversible, kosloff2002discrete, feldmann2003quantum]. Una vez que se ha tomado en cuenta la energía que, en un ciclo del motor, se produce en los segmentos de transferencia de calor, los elementos no diagonales son eliminados. Esta pérdida lleva al fenómeno de fricción.

En Termodinámica cuántica los segmentos de transferencia de calor son descritos por una interacción sistema-baño modelada por técnicas de sistemas cuánticos abiertos. Comúnmente se utiliza el generador LGKS [lindblad1976generators, gorini1976completely]. Una característica esencial de cualquier máquina es su eficiencia, definida como la razón entre el trabajo de salida y el calor de entrada. La eficiencia máxima, en general, corresponde a condiciones cuasiestáticas y por tanto a potencia cero. Para operación a potencia finita no se permite que el proceso de transferencia térmica alcance equilibrio con el reservorio, ya que, en principio, esto ocurre a tiempo infinito. La potencia máxima de salida se obtiene optimizando el tiempo asignado a cada uno de los segmentos del ciclo. La eficiencia del motor a potencia máxima puede ser comparada con los resultados conocidos de termodinámica de tiempo finito [curzon1975efficiency, andresen1984thermodynamics, salamon2001principles, PhysRevA.21.2115, bejan1995entropy, PhysRevLett.105.150603]. En el límite de alta temperatura, el modelo cuántico converge al resultado de termodinámica a tiempo finito [geva1992quantum, rezek2006irreversible, geva1992classical].

El principal ejemplo de un motor de calor continuo es un láser de 3 niveles, que es limitado por la eficiencia de Carnot [scovil1959three, geusic1967quantum]. La optimización de la potencia lleva a una eficiencia a máxima potencia idéntica al caso en termodinámica cuántica de tiempo finito [kosloff1984quantum]. Se han introducido muchos modelos para diferentes tipos de motores cuánticos continuos, todos consistentes con las leyes de la termodinámica [alicki1979quantum, kosloff1984quantum, lloyd1997quantum, wang2009thermal, allahverdyan2008work, geva1996quantum].

Un ejemplo importante de refrigerador continuo es el enfriamiento láser. En este contexto, esto se consigue al revertir la operación de un láser de 3 niveles [geva1996quantum, kosloff2000quantum, geusic1959three, tsujikawa1963possibility, hansch1975cooling]. Un refrigerador cuántico de absorción también ha sido estudiado, que corresponde a un refrigerador que utiliza calor como su fuente de poder [palao2001quantum, levy2012quantum]. Un ejemplo podría ser un refrigerador operado con luz solar [cleuren2012cooling].

Chapter 2

FUNDAMENTALS

2.1 Light-matter interaction

2.1.1 Quantum Rabi model

The most fundamental model to describe the light-matter interaction is the quantum Rabi model. This model consider the most basic form of the light, it is only one frequency mode, interacting with a two-level-system (TLS), which modelled the matter in the most fundamental way.

2.2 Quantum Computing

2.2.1 Quantum bit

2.2.2 Quantum gate

2.3 Quantum Simulation

2.3.1 Analog quantum simulation

2.3.2 Digital quantum simulation

2.4 Superconducting circuit

2.4.1 Spanning tree method

2.4.2 Josephson junction

2.4.3 Superconducting transmission line

2.4.4 Superconducting quantum interference device

2.4.5 Flux qubit

2.4.6 Charge qubit

APPENDIX