

# Seminario de Mecánica Cuántica

## Práctica II (Curso 2012)

### I. Traza Parcial, Entrelazamiento y Medidas

1) Hallar el estado reducido del subsistema de los primeros  $m$  qubits y evaluar la entropía de entrelazamiento de la correspondiente partición  $(m, n - m)$ , con  $1 \leq m \leq n - 1$ , para los estados siguientes:

$$\begin{aligned} |\Psi\rangle &= (|0\dots 0\rangle + |1\dots 1\rangle)/\sqrt{2} \\ |\Phi\rangle &= (|10\dots 0\rangle + |010\dots\rangle + \dots |0\dots 01\rangle)/\sqrt{n} \\ |\Theta\rangle &= (|0\dots 01\rangle + |0\dots 10\rangle)/\sqrt{2} \end{aligned}$$

2) Sea  $b_i, b_i^\dagger$  operadores de aniquilación y creación de un bosón en estados ortonormales  $|i\rangle$  ( $[b_i, b_j] = 0, [b_i, b_j^\dagger] = \delta_{ij}$ ), con  $b_i|0\rangle = 0 \forall i$  ( $|0\rangle \equiv |0\dots 0\rangle$ ). Determinar el estado reducido de cada modo y la entropía de entrelazamiento entre ellos en los estados ( $i \neq j$ )

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(b_i^\dagger + b_j^\dagger)|0\rangle, \quad |\Phi\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}}(1 + b_i^\dagger + b_j^\dagger)|0\rangle$$

3) Dado el estado  $|\Psi_{AB}\rangle = \sum_{i,j} C_{ij}|ij\rangle$ , con  $\langle ij|kl\rangle = \delta_{ik}\delta_{jl}$  y  $|ij\rangle \equiv |i_A\rangle \otimes |j_B\rangle$ ,

a) Determine el estado reducido del sistema  $A$ .

b) Supongamos que se realiza una medida local en el sistema  $B$ , en la base  $\{|j_B\rangle\}$ . Determine el estado conjunto del sistema y el estado reducido del sistema  $A$  luego de la medición, si se obtiene el resultado  $j$ .

c) Determinar el estado promedio del sistema conjunto y del sistema  $A$  luego de la medición.

4) Mostrar que  $\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|++\rangle + |--\rangle)$ , siendo  $|\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle \pm |1\rangle)$ , pero que  $\rho_{01} = \frac{1}{2}(|00\rangle\langle 00| + |11\rangle\langle 11|) \neq \rho_{+-} = \frac{1}{2}(|++\rangle\langle ++| + \frac{1}{2}|--\rangle\langle --|)$ . Hallar un observable que logre distinguir  $\rho_{01}$  de  $\rho_{+-}$ . Es posible distinguirlos localmente?

### II. Compuertas Lógicas Cuánticas

1) Utilizando la notación  $X = \sigma_x, Y = \sigma_y, Z = \sigma_z$ , escribir las matrices que representan, en la base computacional  $\{|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle\}$ , los operadores

$$a) X \otimes I, \quad b) I \otimes X, \quad c) X \otimes X, \quad d) U_X = |0\rangle\langle 0| \otimes I + |1\rangle\langle 1| \otimes X$$

Verificar que el operador  $U_X$  es el Control Not cuántico en la base std. Verificar también que todos los operadores anteriores son unitarios y determinar sus inversas.

2) Comprobar que  $W = U_X(H \otimes I)$ , con  $H = (X + Z)/\sqrt{2}$  la compuerta de Hadamard, transforma la base computacional en la base de Bell, determinando su representación matricial. Concluir que una medición en la base de Bell (es decir, basada en proyectores ortogonales sobre estos estados) es equivalente a aplicar  $W^\dagger = (H \otimes I)U_X$  seguido de una medición en la base computacional (y una nueva aplicación de  $W$ ). Representar mediante un circuito la anterior equivalencia.

3) Mostrar que  $U_S = U_X \bar{U}_X U_X$ , con  $U_X = |0\rangle\langle 0| \otimes I + |1\rangle\langle 1| \otimes X$  y  $\bar{U}_X = I \otimes |0\rangle\langle 0| + X \otimes |1\rangle\langle 1|$ , es el operador de "swap", que satisface

$$U_S|ab\rangle = |ba\rangle$$

para todo estado producto  $|ab\rangle = |a\rangle|b\rangle$ . Escribir la matriz que representa a  $U_S$  en la base computacional y dibujar el circuito correspondiente.