

IF, Universidade de São Paulo

Componentes soft e semihard das distribuições de multiplicidade na abordagem da fatorização k_T .

Henrique Rodrigues Martins Fontes

15 de outubro de 2024



$$P(n) = \frac{\Gamma(k+n)}{\Gamma(k)\Gamma(n+1)} \frac{\langle n \rangle^n k^k}{(\langle n \rangle + k)^{n+k}}. \quad (1)$$

- Sabe-se que as distribuições de multiplicidade de partículas carregadas são empiricamente bem descritas pela Distribuição Binomial Negativa (NBD).
- O parecimento de uma estrutura em forma de ombro nos dados experimentais fez com que a NBD simples fosse revisitada.



$$P(n) = \lambda [\alpha_s P(n, \langle n_s \rangle, k_s) + (1 - \alpha_s) P(n, \langle n_{sh} \rangle, k_{sh})], \quad (2)$$

onde

$$P(n, \langle n \rangle, k) = \frac{\Gamma(k + n)}{\Gamma(k) \Gamma(n + 1)} \frac{\langle n \rangle^n k^k}{(\langle n \rangle + k)^{n+k}}. \quad (3)$$

- A estrutura em forma de ombro observada nos dados foi interpretada como a sobreposição ponderada de eventos soft e hard, cada classe sendo descrita por uma NBD simples (Giovannini e Ugoccioni, 1999).
- Como calcular os componentes soft e semihard?



Na fatorização k_T , a multiplicidade por unidade de rapidez é dada por (Wang et al., 2013):

$$\frac{dn}{dy} = \frac{K}{S} \frac{4\pi N_c}{N_c^2 - 1} \int_{p_{\perp min}}^{p_{\perp max}} \frac{dp_{\perp}^2}{p_{\perp}^2} \int^{p_{\perp}} dk_{\perp}^2 \alpha_s(Q^2) \varphi_1(x_1, k_{\perp}^2) \varphi_2(x_2, |\vec{p} - \vec{k}_{\perp}|^2), \quad (4)$$

onde $x_{1,2} = \frac{p_{\perp}}{\sqrt{s}} \exp\{(\pm y)\}$, N_c é o número de cores, K é um fator que descreve a conversão de pártos para hádros, S é a área de interação da colisão e φ é a distribuição de glúons não-integrada.



A distribuição de glúons escolhida foi a do modelo GBW, dada por:

$$\varphi_{1,2}(x_{1,2}, p_{\perp}^2) = \frac{3\sigma_0}{4\pi^2\alpha_s(Q_{s1,2})} \frac{p_{\perp}^2}{Q_{s1,2}^2} \exp\left(\frac{-p_{\perp}^2}{Q_{s1,2}^2}\right), \quad (5)$$

onde

$$Q_{s1,2}^2(y) = Q_0^2 \left(x_0 \frac{\sqrt{s}}{Q_0} \exp(\pm y) \right)^\lambda. \quad (6)$$

A constante de acoplamento α_s é dada por:

$$\alpha_s(Q^2) = \min \left[\frac{12\pi}{27 \ln \frac{Q^2}{\Lambda_{QCD}^2}}, 0.52 \right], \quad (7)$$

em que

$$Q^2 = \max[p_{\perp}^2, \min(Q_{s,1}^2, Q_{s,2}^2)] \quad (8)$$



Podemos relacionar a distribuição de glúons não-integrada com a densidade de glúons da seguinte forma:

$$xG(x, \mu^2) = \int^{\mu^2} dk_{\perp}^2 \varphi(x, k_{\perp}^2). \quad (9)$$

A principal contribuição para a expressão da fatorização k_T é dada por duas regiões de integração sobre k_{\perp} : $k_{\perp} \ll p_{\perp}$ e $|\vec{p} - \vec{k}|_{\perp} \ll p_{\perp}$. Sendo assim, podemos reescrever como:

$$\frac{dn}{dy} = \frac{K}{S} \frac{4\pi N_c}{N_c^2 - 1} \int_{p_{\perp min}}^{p_{\perp max}} \frac{dp_{\perp}^2}{p_{\perp}^4} \alpha_s(Q^2) xG_2(x_2, p_{\perp}^2) xG_1(x_1, p_{\perp}^2), \quad (10)$$

onde

$$xG(x, p_{\perp}^2) = \frac{3\sigma_0}{4\pi^2 \alpha_s(Q_s^2)} \left(Q_s^2 - \exp\left\{-\frac{p_{\perp}^2}{Q_s^2}\right\} (p_{\perp}^2 + Q_s^2) \right) \left(1 - \frac{p_{\perp}}{\sqrt{s}} e^{\pm y} \right)^4 \quad (11)$$



A partir da expressão da fatorização k_T , podemos separar a integral em p_\perp em duas utilizando um cutoff Λ que separa a contribuição soft da semihard:

$$\frac{dn}{dy} = \frac{dn_s}{dy} + \frac{dn_{sh}}{dy}, \quad (12)$$

onde

$$\frac{dn_s}{dy} = \frac{K}{S} \frac{4\pi N_c}{N_c^2 - 1} \int_{p_{\perp min}}^{\Lambda} \frac{dp_\perp^2}{p_\perp^4} \alpha_s(Q^2) xG_2(x_2, p_\perp^2) xG_1(x_1, p_\perp^2) \quad (13)$$

e

$$\frac{dn_{sh}}{dy} = \frac{K}{S} \frac{4\pi N_c}{N_c^2 - 1} \int_{\Lambda}^{p_{\perp max}} \frac{dp_\perp^2}{p_\perp^4} \alpha_s(Q^2) xG_2(x_2, p_\perp^2) xG_1(x_1, p_\perp^2) \quad (14)$$

Por fim, realizando a transformação de variável $y \rightarrow \eta$ e integrando em η , temos:

$$\langle n \rangle_{CGC} = \langle n_s \rangle_{CGC} + \langle n_{sh} \rangle_{CGC} \quad (15)$$



A partir da expressão da NBD dupla, temos que:

$$\langle n \rangle_{NBD} = \lambda \alpha_s \langle n_s \rangle + \lambda (1 - \alpha_s) \langle n_{sh} \rangle. \quad (16)$$

Se assumirmos que $\langle n \rangle_{NBD} = \langle n \rangle_{CGC}$, temos que:

$$\lambda \alpha_s \langle n_s \rangle = \langle n_s \rangle_{CGC} \quad (17)$$

$$\lambda (1 - \alpha_s) \langle n_{sh} \rangle = \langle n_{sh} \rangle_{CGC} \quad (18)$$

Com isso, podemos definir as componentes soft e hard de $\langle n \rangle$ da NBD dupla com base nos resultados da fatorização de k_{\perp} . Assim, basta determinar α_s e λ por meio de um ajuste aos dados experimentais, além de estimar k_s e k_{sh} da mesma maneira. Esse procedimento reduz o número de parâmetros ajustáveis de 6 para apenas 4.



Como se está definindo as expressões:

$$\langle n_s \rangle = \frac{\langle n_s \rangle_{CGC}}{\lambda \alpha_s}, \quad \langle n_{sh} \rangle = \frac{\langle n_{sh} \rangle_{CGC}}{\lambda(1 - \alpha_s)} \quad (19)$$

O espaço de solução dos parâmetros λ, α_s, k_s e k_{sh} é restringido, pois $\langle n_s \rangle_{CGC}$ e $\langle n_{sh} \rangle_{CGC}$ estão determinando parcialmente os valores que $P(n, \langle n_s \rangle, k_s)$ e $P(n, \langle n_{sh} \rangle, k_{sh})$ podem assumir. Sendo assim, não se garante a normalização da NBD dupla. Para contornar isso, implicamos que a NBD dupla deve ter a mesma normalização dos dados experimentais. Fazemos isso multiplicando a expressão da NBD dupla por:

$$\frac{\sum_n P_{\text{dados}}(n)}{\sum_n P_{NBD}(n)}. \quad (20)$$



Para produzir os resultados, consideramos os seguintes valores dos parâmetros fixos:

Q_0 (GeV)	x_0	λ	Λ_{QCD} (GeV)	Λ_{cutoff} (GeV)	σ_0 (mb)
1	$4 \cdot 10^{-5}$	0.248	0.226	1.1	27.43

Tabela: Valores dos parâmetros fixos

O parâmetro K/S da fatorização k_T foi ajustado aos dados de distribuição de pseudo-rapidez caso a caso, i.e. para cada energia.



Resultados distribuição de pseudo-rapidez

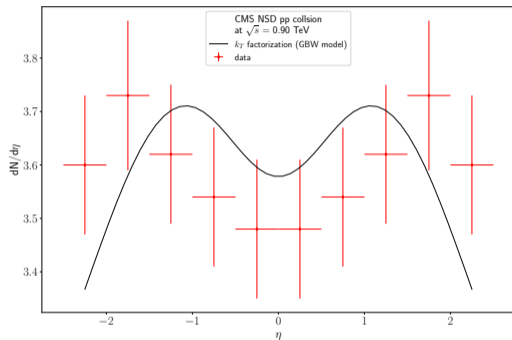


Figura: Distribuição de pseudo-rapidez em colisões pp a 0.9 TeV.

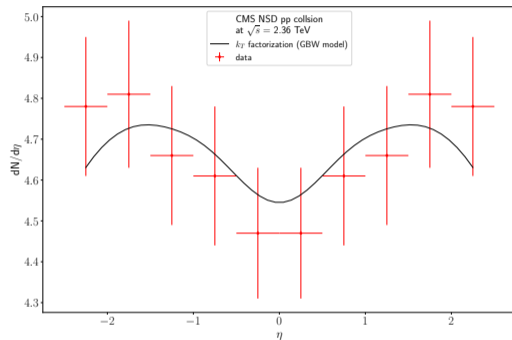


Figura: Distribuição de pseudo-rapidez em colisões pp a 2.36 TeV.



Resultados distribuição de pseudo-rapidez

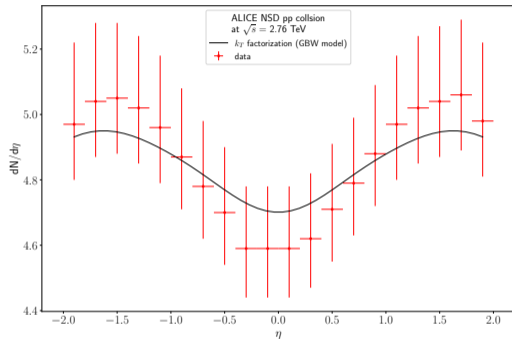


Figura: Distribuição de pseudo-rapidez em colisões pp a 2.76 TeV (ALICE, 2017a).

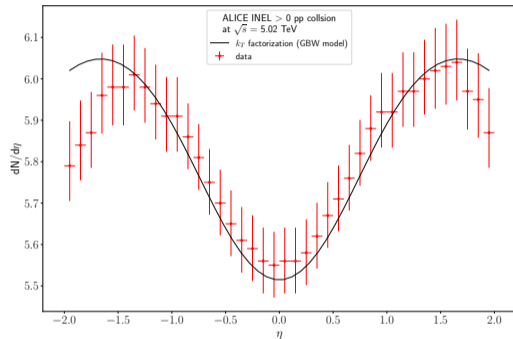


Figura: Distribuição de pseudo-rapidez em colisões pp a 5.02 TeV (Acharya et al., 2023).



Resultados distribuição de pseudo-rapidez

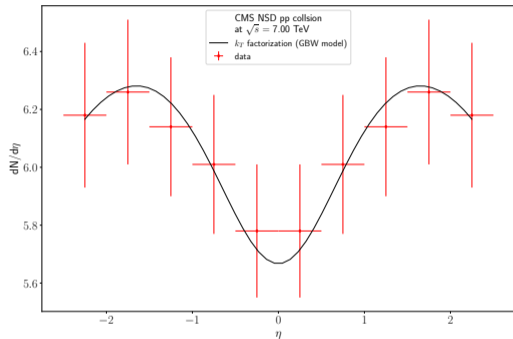


Figura: Distribuição de pseudo-rapidez em colisões pp a 7 TeV.

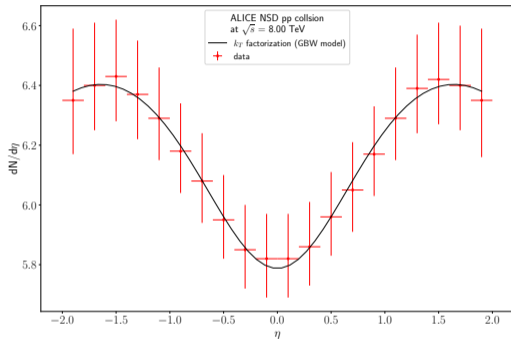


Figura: Distribuição de pseudo-rapidez em colisões pp a 8 TeV (ALICE, 2017a).



Resultados distribuição de pseudo-rapidez

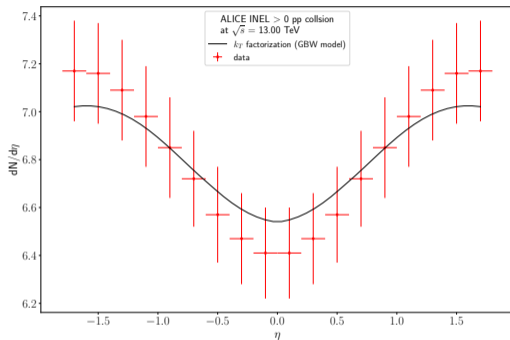


Figura: Distribuição de pseudo-rapidez em colisões pp a 13 TeV.



Resultados distribuição de multiplicidade

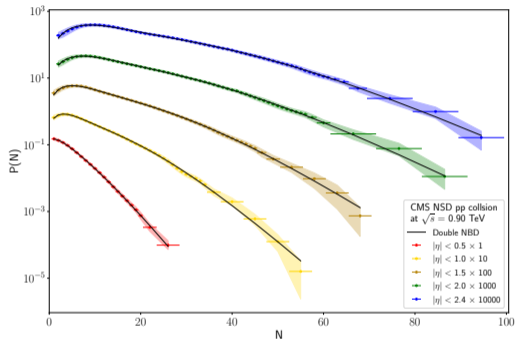


Figura: Distribuições de multiplicidade de partículas carregadas em colisões pp para $|\eta| < 0.5$ a 2.4, com energia de $\sqrt{s} = 0.9$ TeV.

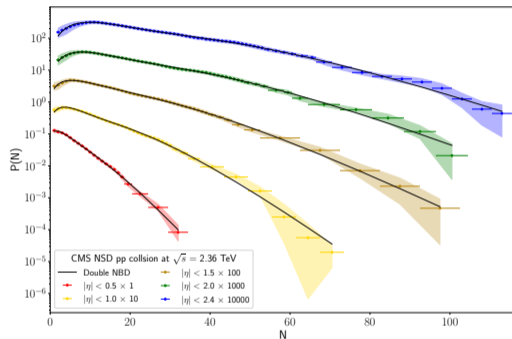


Figura: Distribuições de multiplicidade de partículas carregadas em colisões pp para $|\eta| < 0.5$ a 2.4, com energia de $\sqrt{s} = 2.36$ TeV.



Resultados distribuição de multiplicidade

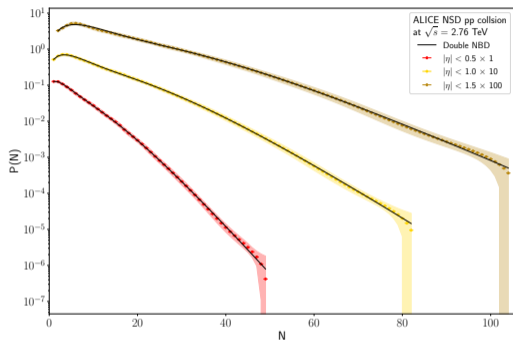


Figura: Distribuições de multiplicidade de partículas carregadas em colisões pp para $|\eta| < 0.5$ a 1.5 , com energia de $\sqrt{s} = 2.76$ TeV (ALICE, 2017a).

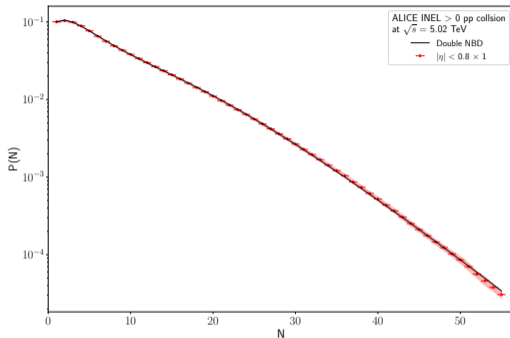


Figura: Distribuição de multiplicidade de partículas carregadas em colisões pp para $|\eta| < 0.8$, com energia de $\sqrt{s} = 5.02$ TeV.



Resultados distribuição de multiplicidade

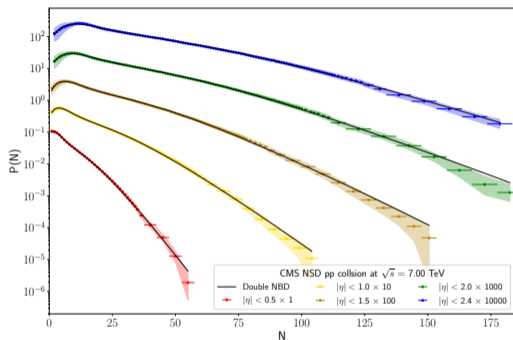


Figura: Distribuições de multiplicidade de partículas carregadas em colisões pp para $|\eta| < 0.5$ a 2.4, com energia de $\sqrt{s} = 7$ TeV.

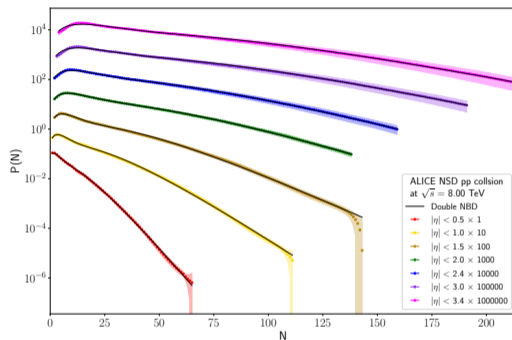


Figura: Distribuições de multiplicidade de partículas carregadas em colisões pp para $|\eta| < 0.5$ a 3.4, com energia de $\sqrt{s} = 8$ TeV (ALICE, 2017a; ALICE, 2017b).



Resultados distribuição de multiplicidade

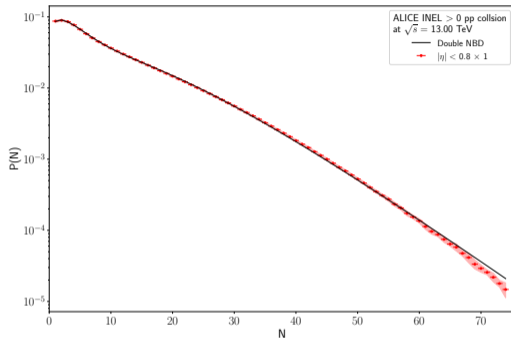


Figura: Distribuição de multiplicidade de partículas carregadas em colisões pp para $|\eta| < 0.8$, com energia de $\sqrt{s} = 13$ TeV.



χ^2 reduzido

Tabela: χ^2 reduzidos obtidos a partir do ajuste da NBD dupla aos dados para diferentes janelas de pseudo-rapidez ($-\eta_c < \eta < +\eta_c$) e energias (\sqrt{s}).

\sqrt{s} (TeV)	η_c	χ^2/dof
0.9	0.5	0.033
	1.0	0.121
	1.5	0.055
	2.0	0.041
	2.4	0.056
2.36	0.5	0.170
	1.0	0.237
	1.5	0.099
	2.0	0.140
	2.4	0.101

\sqrt{s} (TeV)	η_c	χ^2/dof
2.76	0.5	0.021
	1.0	0.012
	1.5	0.032
5.02	0.8	0.316
7.00	0.5	0.130
	1.0	0.110
	1.5	0.148
	2.0	0.129
	2.4	0.082

\sqrt{s} (TeV)	η_c	χ^2/dof
8.00	0.5	0.030
	1.0	0.043
	1.5	0.058
	2.0	0.025
	2.4	0.029
13.00	3.0	0.062
	3.4	0.065
13.00	0.8	1.453



- A abordagem usual para a descrição dos dados a partir da NBD dupla era ajustar todos os 6 parâmetros, sem fazer uso de uma teoria que descrevesse a dinâmica dos processos.
- No nosso caso, utilizamos o formalismo do Color Glass Condensate para descrever dois parâmetros da NBD dupla que dependem totalmente da dinâmica do processo de produção: $\langle n_s \rangle$ e $\langle n_{sh} \rangle$.
- Ainda temos que ajustar alguns parâmetros, mas a redução de 6 para 4 puramente utilizando teoria já é um ganho!
- Ainda existe a possibilidade de realizar previsões se analisarmos as variáveis ajustadas e percebermos um comportamento.
- Como próximo passo, iremos usar esta metodologia para descrever os dados de colisões p-Pb.