

Ventiladors mecànics per a pacients múltiples

Data: 20 de març de 2020

Punts d'interès:

- El COVID-19 podria superar el nombre de ventiladors mecànics disponibles. Això ha provocat l'interès en utilitzar un sol ventilador per donar suport a diversos pacients.
- Són respiradors o ventiladors de pressió positiva amb modificacions en els circuits per poder ventilar, amb un sol ventilador, diversos pacients (2 a 4) en un temps limitat (12h), per tant es tracta d'un ús *off-label*
- Tot i la limitada experiència en humans i l'escassa evidència en models animals i en pulmons simulats, mostra la seva factibilitat.
- Aspectes a tenir en compte per la seva aplicació:
 - El principi bàsic de ventilació de múltiples pacients és que cada pacient no hauria de tenir cap efecte sobre la ventilació d'altres pacients connectats al ventilador
 - La ventilació ciclada per pressió (*pressure-cycled ventilation*) és superior a la ventilació ciclada per volum (*volume-cycled ventilation*)
 - Cal una ventilació obligatòria contínua (*continuous mandatory ventilation –CMV- is required*)
 - L'eficàcia de ventilació és sub-òptima
 - Els pulmons han de ser de grandària semblant (adults, no posar pediàtrics i adults junts) però cal esperar que la resistència al flux (flow) i l'acompliment (*compliance*) siguin molt variables entre els pacients amb insuficiència respiratòria aguda.
 - El risc de contaminació creuada (en la síndrome de distrès respiratori agut – ARDS per les seves sigles en anglès) per pneumònia vírica no és tan important
- Hauria de ser un últim recurs (situació d'extrema necessitat) un cop s'han pres les altres mesures com la reconversió de llits (de cures intermèdies, coronària, reanimació, anestèsia, d'aturades,...) per passar a ser llits de crítics i s'ha de fer un recull de tots els ventiladors disponibles (fins i tots els ressuscitadors manuals AMBÚ -de l'anglès *Airway Mask Bag Unit*- també coneguts com a bosses auto-inflables) i en bon estat en els hospitals públics i privats.
- Aquesta estratègia s'ha de ponderar contra d'altres, com ara proporcionar ventilació mecànica només a aquells pacients amb més probabilitat de sobreviure (que en realitat es poden veure perjudicats per l'estratègia proposada).

Informe ràpid

En situacions catastròfiques s'ha referit la necessitat de múltiples pacients que, en estat crític, requereixen ventilació mecànica. Pot aparèixer la situació de no haver-hi prou ventiladors per atendre una gran demanda(8). En aquest sentit s'ha proposat l'adaptació dels circuits en la respiració assistida que permeti que un nombre determinat de pacients(2 o 4 pacients) puguin ser ventilats amb un sol ventilador. A la literatura científica s'han trobat experiències amb models de simulació pulmonars(1) i en animals(2) de l'aplicació d'aquests sistemes de compartir ventiladors. Un vídeo explicatiu sobre la seva aplicació fa referència a com es va utilitzar aquest sistema en humans durant un desastre a Texas i els resultats favorables que es van obtenir(3). Aquesta aplicació es basava en l'estudi de viabilitat publicat el 2006(1) (més informació pràctica a l'Annex 1).

En el mateix vídeo es refereixen qüestions a tenir en compte com són: la similitud física entre els individus ventilats (incompatibilitat pacient adult i pacient pediàtric) i el problema de la infecció creuada que, atenent a una patologia amb el mateix origen (síndrome de distrés respiratori agut per pneumònia vírica) pren una importància secundària. Tanmateix, quan el ventilador es divideix entre dos pacients resulta obvi que no es pot realitzar el principi d'adaptar el ventilador a cada pacient particular (si no a l'inrevés), sent aquesta una problemàtica que no es pot resoldre quan les necessitats ventilatòries difereixen substancialment (vegeu Annex 2 per a més informació)(4). Per tant, és un recurs d'última elecció.

També cal tenir en compte que alguns dels avantatges de la ventilació mecànica poden quedar limitats per l'aplicació d'aquesta estratègia (ús múltiple)(6,7): una ventilació adequada, la conservació de l'oxigen, permetre al personal fer altres funcions gràcies a les alarmes que identifiquen i alerten d'interaccions pacients-ventiladors no segures, no poder controlar el volum tidal o corrent $V(T)$ per a cada subjecte i la disparitat de $V(T)$ proporcional a la variabilitat d'acompliment. La ventilació mecànica també pot ser més segura durant una epidèmia amb un patògen contagiós, perquè la ventilació manual requerirà que algú estigui constantment present al costat del pacient.

Abans de plantejar la seva utilització s'han d'haver pres altres mesures que suposin la reconversió de llits (de cures intermèdies o semicrítics, coronària, reanimació, anestèsia, d'aturades, etc.) que passin a ser llits de crítics, així com un recull de tots els ventiladors a l'abast (fins i tot els manuals o AMBÚ) que estiguin en bon estat i es puguin utilitzar, tant en els hospitals públics com als privats o en altres espais (ambulàncies per transport de pacients crítics).

És clar que els recursos de cures crítiques són els que poden ser més necessaris davant aquesta pandèmia del COVID-19 i, per tant, ha d'haver-hi una estreta coordinació dels mateixos entre els diferents caps de serveis (centres públics i privats) i on es puguin explorar les reconversions que siguin necessàries i tots els ventiladors disponibles. Serà en una situació extrema en què podrà plantejar-se l'ús d'aquests sistemes de ventiladors compartits on l'evidència humana, tot i ser molt escassa, mostra la seva factibilitat. En els articles i vídeo també dels intensivistes italians al JAMA no s'ha trobat cap referència en què esmentessin aquesta possibilitat(5). Potser és una manera d'evitar decisions de prioritització difícils i arriscades. Aquest material de vídeo hauria de ser compartit entre els intensivistes (i anestesistes).

Bibliografia

- 1 Neyman G, Irvin CB. A single ventilator for multiple simulated patients to meet disaster surge. . Acad Emerg Med. 2006 Nov;13(11):1246-9. Epub 2006 Aug 2.
www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16885402
- 2 Paladino L, Silverberg M, Charchafieh JG, Eason JK, Wright BJ, Palamidessi N, et al. Increasing ventilator surge capacity in disasters: ventilation of four adult-human-sized sheep on a single ventilator with a modified circuit. . Resuscitation. 2008 Apr;77(1):121-6..
www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18164798
3. How to use one ventilator to save multiple lives [Video] Explicació sobre com modificar ventiladors per atendre més d'un pacient, per la Dra. Charlene Babcock, Department of Emergency Medicine, St. John Hospital and Medical Center, Wayne State University, Detroit, Michigan, USA) , 14 de març de 2020. www.youtube.com/watch?v=uClq978oohY&feature=youtu.be
- 4 Farkas J. PulmCrit – Splitting ventilators to provide titrated support to a large group of patients (March 15, 2020). <https://emcrit.org/pulmcrit/split-ventilators/>
- 5 Coronavirus in Italy—Report From the Front Lines. Review how Italian health care leaders adapted ICU utilization protocols to centralize processes. JAMA (March 16, 2020). <https://edhub.ama-assn.org/jn-learning/video-player/18315311?widget=personalizedcontent&previousarticle=2763188>
- 6 Branson RD, Rubinson L. A single ventilator for multiple simulated patients to meet disaster surge.. Acad Emerg Med. 2006 Dec;13(12):1352-3; author reply 1353-4.
www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17158729
- 7 Branson RD, Blakeman TC, Robinson BR, Johannigman JA. Use of a single ventilator to support 4 patients: laboratory evaluation of a limited concept. Respir Care. 2012 Mar;57(3):399-403.
www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22005780
- 8 Branson RD, Johannigman JA, Daugherty EL, Rubinson L. Surge capacity mechanical ventilation. . Respir Care. 2008 Jan;53(1):78-88; discussion 88-90. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18173862/>

Estratègia de cerca

(Ventilators, Mechanical[majr] OR ventilat*[title]) AND (Emergency Service, Hospital[Majr] OR Respiratory Insufficiency[Majr] OR emergent*[title] OR respirator*[title]) AND (Disasters[Majr] OR Disease Outbreaks[Majr] OR epidemics[majr] OR pandemics[Majr] OR catastroph*[title] OR outbreak*[title] OR pandem*[title] OR epidem*[title])

Annex 1

Com modificar 1 ventilador per ventilar de 2 a 4 pacients simultàniament

- Fer servir equipament ja disponible a l'hospital (Urgències, UCIs, etc.)
- 1 T-Tube (tub T) (sense el sac) així es queda només el tub T.
- 1 adaptador T-Tube (22mm), configurat amb 4 ports en forma de "H" per connectar tubs d'expiració i inspiració

Com van fer l'estudi en pulmons simulats

- Es van enganxar els pulmons de prova als tubs
- 6 hores de control de pressió (amb aigua de 25 cm)
- Control de volum (amb volum tidal o corrent *-tidal volume-* de 2 L)
- 4 pulmons de prova (cadascun obtindria uns 500 ml)

Mesures d'estudi:

Volum tidal o corrent mitjà (*average tidal volume*) (471 cc), mitjançant control de pressió a 25cm d'aigua

Volum tidal o corrent mitjà, per pulmó de prova (510 ml), mitjançant control de volum, amb un volum tidal o corrent (*title volume*) de 2 L

Com fer-ho en pacients reals

- Els pulmons han de ser iguals de mesura entre les 4 parts del circuit.
 - No poseu nens amb adults.
- Assegureu-vos que la resistència és la mateixa.
 - Voleu mantenir el mateix volum entre tots els pacients.
- La mesura dels tubs han de ser la mateixa per a tots els pacients
- Configureu els pacients amb un ventilador al centre amb els 4 caps al centre, així la mateixa quantitat de tub hauria de arribar a cada pacient.

Altra experiència en el món real. (Dr. Kevin Menace)

- Es van posar 2 pacients per ventilador.
- Resultats d': es van mantenir vius els pacients mentre esperaven els ventiladors.

Per a 2 pacients per ventilador:

- Utilitzeu 1 divisor T amb 1 adaptador i enganxeu-lo directament al ventilador.
 - D'aquesta manera tindreu 2 ports en lloc de 4.

Annex 2

PulmCrit – Splitting ventilators to provide titrated support to a large group of patients March 15, 2020 by Josh Farkas

<https://emcrit.org/pulmcrit/split-ventilators/https://emcrit.org/pulmcrit/split-ventilators/>

basic principles

Bedrock principle: Patient-Ventilator Independence

Normally, we adjust the ventilator so that the ventilator is adapted well to suit an individual patient's needs. The adage is "*fit the ventilator to the patient, don't fit the patient to the ventilator*" – in other words, adjust the ventilator to keep the patient comfortable, rather than over-sedating the patient to tolerate an uncomfortable ventilator mode.

We cannot do this when splitting the ventilator. In fact, any interaction where the patient drives the ventilator is problematic (because this allows one patient to affect another patient's ventilation). For example, we wouldn't want one patient's tachypnea to cause other patients attached to the same ventilator to be hyperventilated.

Thus, a bedrock principle of multiple-patient ventilation is that each patient should have *no effect* on the ventilation of other patients attached to the ventilator. This is achievable, as described below. The alternative is chaos.

Pressure-cycled ventilation is superior to volume-cycled ventilation

The debate regarding pressure-cycled ventilation versus volume-cycled ventilation is perpetual in critical care. Most units and physicians have some preference, but either strategy works well for most patients. In short, the advantages of each are as follows:

- Volume-cycled ventilation: Advantage is delivery of a guaranteed tidal volume (disadvantage is lack of control over peak pressure).
- Pressure-cycled ventilation: Advantage is guaranteed limitation of the peak pressure (disadvantage is lack of control over tidal volume).

Once we start splitting a ventilator between multiple patients, this debate largely evaporates. Using a volume-cycled mode has numerous, major disadvantages:

1. Using a volume-cycled mode with multiple patients provides *no* control over the tidal volume of any patient, and also provides *no* control on the maximal airway pressure. This is literally the worst of both worlds.
2. A volume-cycle mode will introduce the possibility of deleterious interactions between patients. For example, let's suppose Patient A's endotracheal tube gets kinked. This will cause Patient B to receive dangerously large tidal volumes!
3. Patients sharing the ventilator must have similar *size*, similar FiO₂ and similar PEEP requirements.

Using a pressure-cycled mode solves these problems:

1. With a pressure-cycled mode, we *retain* control over the maximal airway pressure and the driving pressure. We cannot deliver a guaranteed tidal volume to any patient, but that is no different from having any patient on pressure-cycled ventilation. Ability to control and limit the *driving pressure* may allow this strategy to be reasonably lung-protective.¹
2. Deleterious interactions between patients are avoided using a pressure-cycled mode. For example, if Patient A's endotracheal tube gets kinked in a pressure-cycled mode, then Patient A will receive a reduced tidal volume. However, this will have *no* impact on Patient B.
3. Patients sharing the ventilator *don't* have to have a similar size. Larger patients will tend to have a greater absolute compliance, so they will receive larger breaths.

Continuous mandatory ventilation (CMV) is required

Normally, patients are able to *trigger* the ventilator to deliver a breath. This isn't possible if a single ventilator is being used to support multiple patients (because, as mentioned earlier, one patient's tachypnea could cause all patients attached to the ventilator to be hyperventilated).

Therefore, the mode of ventilation which must be used is *continuous mandatory ventilation* (CMV). What this means is that the ventilator fires at a set rate. The patient has *no control* over the respiratory rate (i.e. the patient *cannot* trigger a breath). This is an antiquated mode of ventilation, because it's generally uncomfortable. However, it's the only way to achieve patient-ventilator independence.

Modern ventilators may lack a *continuous mandatory ventilation* mode. However, the same effects might be achieved as follows:

1. Increase the ventilator trigger threshold as high as possible, so that it's impossible for patients to trigger a breath (a.k.a. "lock out" the ventilator).
2. If #1 is unsuccessful, *respirolytic sedation* (using drugs that suppress respiratory drive such as opioids and propofol) could be used to reduce patients' respiratory drive and prevent them from triggering the ventilator. Paralysis would be used only as a last resort.

Ventilation efficacy will be sub-optimal

Carbon dioxide clearance will not be optimized by a multi-ventilator strategy for a few reasons:

- Tidal volumes will be difficult to track and optimize.
- Y-site connections and tubing increase dead space

It will probably be necessary to accept permissive hypercapnia. For patients with substantial acidosis, IV bicarbonate may be needed to support pH (more on this [here](#)). As is usually the case in ARDS, the primary focus is providing *lung-protective* ventilation, rather than optimal blood gas parameters.

Management of profound hypoxemia: Pressure Control Inverse Ratio Ventilation (PC-IRV)

Patients with COVID-19 appear to be relatively responsive to PEEP. Of course, PEEP is merely one way to increase the *mean airway pressure* – which is the most important variable affecting lung recruitment. For profound hypoxemia, inverse ratio ventilation may be used to increase the mean airway pressure even further.

Inverse ratio ventilation involves increasing the inspiratory time, so that the patient is spending most of the time in the inspiratory phase (inspiratory time > expiratory time). Inverse ratio ventilation is generally not used because it's uncomfortable, but in this context patients will be deeply sedated anyway. The overall concept here is similar to APRV – trying to maintain an “open lung” with ongoing application of gentle amounts of pressure (rather than abrupt high-pressure recruitment maneuvers).

basic setup to split a single ventilator

So, what this leaves with is the following:

- Multiple patients attached to a single ventilator. The patients don't need to be the same size, but ideally they should have roughly similar severity of lung injury (e.g. similar PEEP and FiO₂ requirements)(more on achieving this matching below).
- The ventilator is set to pressure-cycled ventilation with a high PEEP (noting that patients with COVID-19 seem to be highly PEEP-responsive) and a low driving pressure (to achieve lung protection). For example, a setting of 30 cm / 18 cm might be reasonable for many patients.
- The ventilator trigger is locked out, to prevent patients from triggering breaths.
- Patients will likely require deep sedation to render them passive on the ventilator (e.g. propofol plus opioids). Paralysis isn't necessarily required, but it may be necessary in some cases, depending on how sensitive patients are to sedation.
- Ventilation efficacy of each patient can be tracked using an end-tidal CO₂ monitor placed in-line with their own endotracheal tube (in a shortage of etCO₂ sensors, it might be possible to use a single sensor and rotate it between patients to spot-check the pCO₂ of each patient sequentially).
- Permissive hypercapnia will need to be anticipated and managed, as discussed above.
- Viral filters should be used to prevent cross-contamination of pathogens between different patients.

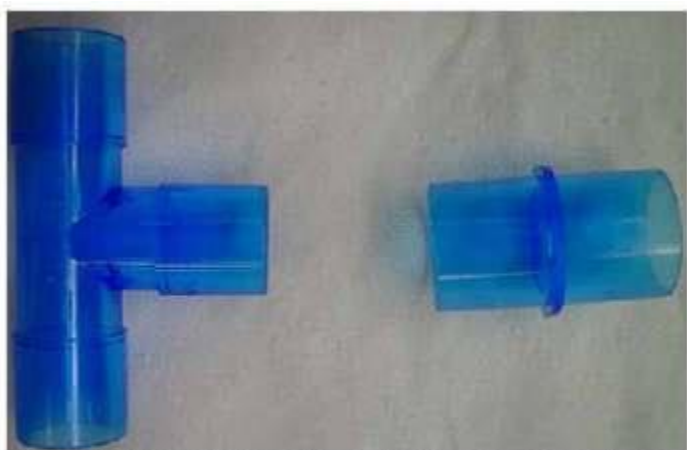


Figure 1. Briggs T-tube with included connection adapter.



Figure 2. Flow splitter configuration of three T-tubes with connection adapters (shown here with trimmed section of ventilator tubing).

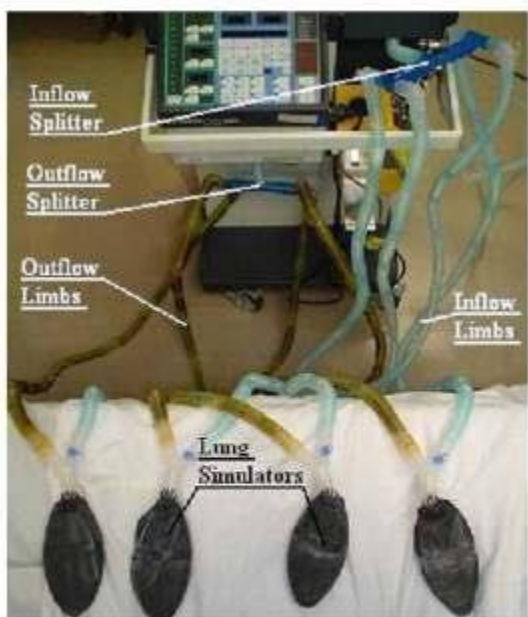


Figure 3. Final configuration of multiple patient ventilation (*outflow limbs darkly stained for purposes of graphic clarity only).

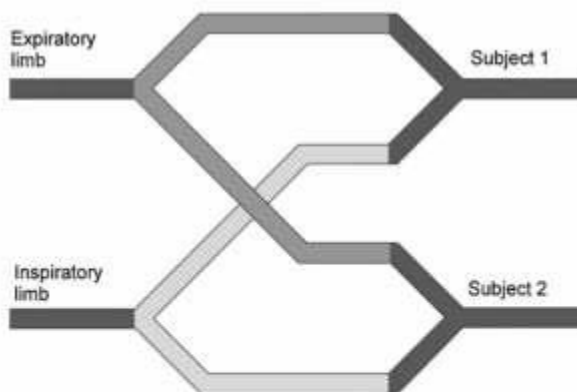


Fig. 1. Two subject ventilator circuit.

Fig 1-3: Neyman G and Irvin CB, Acad Emerg Med 2006; 13(11) 1246.
Fig 4: Smith R and Brown JM, Resuscitation 2009; 80: 1087.

In theory, a single ventilator could be used to support multiple patients (e.g. 2-4 patients, possibly even 6 or 8?). At some point the ventilator may not be powerful enough to support the summed tidal volumes of all the patients.

bigger picture: Five ventilators to provide personalized settings to 20 patients

A major drawback of the above setup is that patients must be matched based on relative severity of lung injury (PEEP and FiO₂ requirements). This issue could be overcome as follows.

Imagine that we set up five ventilators:

- Ventilator 1: Mild injury settings (FiO₂ 50%, PEEP 10 cm, Peak pressure 20 cm)
- Ventilator 2: Moderate injury settings (FiO₂ 60%, PEEP 14 cm, Peak pressure 26 cm)
- Ventilator 3: High injury setting (FiO₂ 80%, PEEP 18 cm, Peak pressure 30 cm)

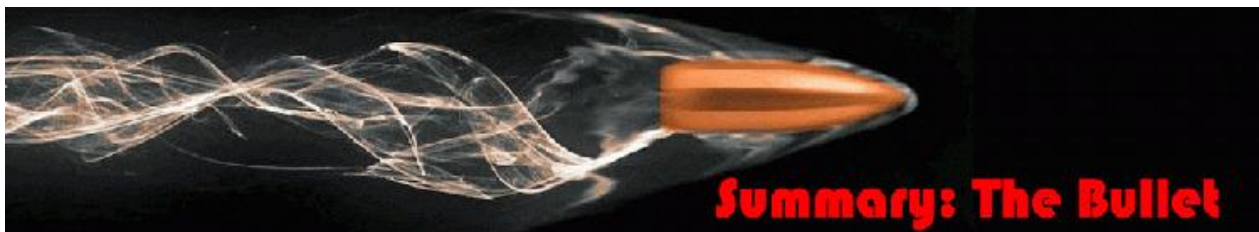
- Ventilator 4: Refractory hypoxemia settings (FiO₂ 100%, PEEP 22 cm, peak pressure 35 cm).
- Ventilator 5: Salvage settings (FiO₂ 100%, PEEP 22 cm, peak pressure 35 cm, inverse ratio ventilation with inspiratory time >> expiratory time).

Each of the ventilators could be connected to 1-4 patients. If patients *deteriorated*, they could be *moved* to a higher-number ventilator (e.g. from Ventilator #2 to #3). Alternatively, as patients *improved*, they could be shifted to a lower-number ventilator. This system could allow a handful of ventilators to provide reasonably personalized settings to a large number of patients.

evidence?

This general concept has been demonstrated using animals and lung models.^{2,3} However, depending on exactly how the model is constructed and what gauge is used to determine “success,” different results can be obtained. For example, Branson et al. demonstrated that multi-lung ventilation cannot be used to deliver precise tidal volumes.⁴ That’s wholly predictable based on physics, so it doesn’t actually reveal anything. So, if we are using delivery of a fixed tidal volume as a gauge for success, then multi-patient ventilation will fail. However, if we are using delivery of a fixed *driving pressure* as a gauge for success, then multi-patient ventilation may succeed.

One published report does describe the use of split ventilation in two volunteers (using a facemask interface, rather than intubation). Pressure cycled ventilation was successfully applied with good results.⁵



- It is almost certainly possible to ventilate several patients with a single ventilator. This probably can be achieved with reasonably lung-protective settings (i.e. low driving pressure). However, the cost of this strategy is loss of control over precise tidal volumes and suboptimal ventilation (with high pCO₂).
- A fundamental goal of multi-patient ventilation is to prevent any patient from affecting the other patients. This may be achievable using pressure-cycled ventilation without the ability of any patient to trigger the ventilator.
- Patients would need to be deeply sedated and passive on the ventilator (or paralyzed if necessary).
- Each patient’s ventilatory efficiency could be monitored using end tidal CO₂. This would be required as a surrogate for tidal volume or minute ventilation (which will not be measurable).
- By using a small number of ventilators with a range of different settings, a large group of patients could be supported with fairly personalized settings.

Possible strategy for multi-patient ventilation

- **Circuit setup**
 - Split ventilator tubing ~1-2 times (depending on patient number).
 - Viral filters to prevent cross-contamination.
 - Individual etCO₂ monitor for each patient (ideally).
- **Ventilator setting**
 - Pressure control setting with high PEEP and low driving pressure (e.g. 30 cm/18 cm).
 - Use the least sensitive trigger setting possible, to ideally “lock out” the trigger and prevent any patient from triggering a breath.
- **Sedation**
 - Patients must be passive on the ventilator (either paralyzed or deeply sedated with agents that suppress respiratory drive such as opioid and/or propofol).
 - May be easiest to start out with patients being completely paralyzed. Once the circuit is up and running, this may be transitioned to deep sedation (titrated against patient comfort).
- **Monitoring**
 - Oxygenation of each patient: pulse oximetry
 - Ventilation of each patient: etCO₂ (+/- occasional ABG/VBG)

-The Internet Book of Critical Care, by @PulmCrit

going further

- COVID IBCC chapter [here](#) (with additional links to other COVID resources at the bottom)

References

1. Amato M, Meade M, Slutsky A, et al. Driving pressure and survival in the acute respiratory distress syndrome. N Engl J Med. 2015;372(8):747-755. doi:[10.1056/NEJMsa1410639](https://doi.org/10.1056/NEJMsa1410639)
2. Neyman G, Irvin C. A single ventilator for multiple simulated patients to meet disaster surge. Acad Emerg Med. 2006;13(11):1246-1249. doi:[10.1197/j.aem.2006.05.009](https://doi.org/10.1197/j.aem.2006.05.009)
3. Paladino L, Silverberg M, Charchafli J, et al. Increasing ventilator surge capacity in disasters: ventilation of four adult-human-sized sheep on a single ventilator with a modified circuit. Resuscitation. 2008;77(1):121-126. doi:[10.1016/j.resuscitation.2007.10.016](https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2007.10.016)
4. Branson R, Blakeman T, Robinson B, Johannigman J. Use of a single ventilator to support 4 patients: laboratory evaluation of a limited concept. Respir Care. 2012;57(3):399-403. doi:[10.4187/respcare.01236](https://doi.org/10.4187/respcare.01236)
5. Smith R, Brown J. Simultaneous ventilation of two healthy subjects with a single ventilator. Resuscitation. 2009;80(9):1087. doi:[10.1016/j.resuscitation.2009.05.018](https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2009.05.018)